ASTROFÍSICA
El misterio de la estrella de Tabby

NEUROCIENCIA
Múltiples causas de la esquizofrenia

EVOLUCIÓN
Zorros convertidos en perros

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Julio 2017 InvestigacionyCiencia.es

Edición española de Scientific American

EL ORIGEN DE LA TECNOLOGÍA

Nuevos hallazgos refutan la teoría vigente sobre el nacimiento de la industria lítica y su impacto en la evolución humana

NUEVA SERIE
MECÁNICA CUÁNTICA
INTERPRETACIÓN Y DIVULGACIÓN



6,90 EUROS

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
ORIGEN DE LA TECNOLOGÍA | CAUSAS DE LA ESQUIZOFRENIA | EL MISTERIO DE LA ESTRELLA DE TABBY
N.º 490
JULIO 2017



CORTESÍA DE LYUDMILA TRUT E INSTITUTO DE CITOLOGÍA Y GENÉTICA

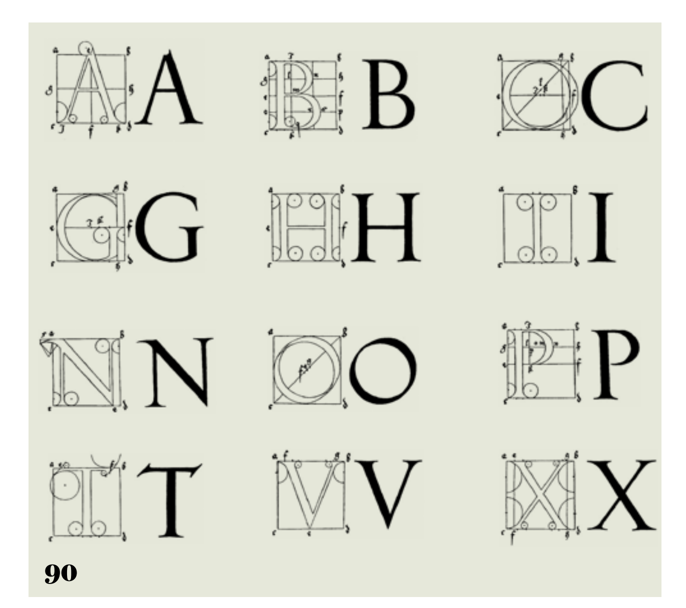
ARTÍCULOS

INVESTIGACIÓN
Y CIENCIA

SECCIONES








EN PORTADA



Un antepasado remoto del linaje humano fabrica herramientas, sirviéndose de un yunque y una piedra percutora para extraer lascas de un núcleo. Las excavaciones realizadas en un yacimiento de Kenia han sacado a la luz útiles que datan de hace 3,3 millones de años, los artefactos más antiguos del mundo. El hallazgo ha desbaratado el conocimiento que se tenía sobre los orígenes de nuestro género, *Homo*. Imagen de Jon Foster.

redaccion@investigacionyciencia.es


COSMOLOGÍA

LA BURBUJA *de la inflación cósmica*

LAS ÚLTIMAS MEDIDAS ASTRONÓMICAS, UNIDAS A PROBLEMAS DE CARÁCTER TEÓRICO, PONEN EN DUDA EL ARRAIGADO MODELO INFLACIONARIO DEL UNIVERSO PRIMITIVO Y PLANTEAN LA NECESIDAD DE NUEVAS IDEAS

Anna Ijjas, Paul J. Steinhardt y Abraham Loeb

Abril 2017

CONTROVERSIA CÓSMICA

El artículo de Anna Ijjas, Paul J. Steinhardt y Abraham Loeb «La burbuja de la inflación cósmica», publicado en el número de abril, ha suscitado una gran controversia entre la comunidad de cosmólogos. En él los autores argumentaban contra uno de los paradigmas centrales de la cosmología moderna: la idea de que nuestro universo experimentó una expansión extraordinariamente rápida en sus primeros instantes, un proceso conocido como «inflación». En el mismo número, Investigación y Ciencia invitó al experto en cosmología inflacionaria Juan García-Bellido a presentar un punto de vista alternativo.

Otros 33 físicos han respondido ahora al artículo de Ijjas, Steinhardt y Loeb en la carta que reproducimos a continuación. Tras ella se incluye la réplica de los autores. Una versión más detallada de sus argumentos se encuentra disponible en physics.princeton.edu/~cosmo/sciam.

En «La burbuja de la inflación cósmica», Anna Ijjas, Paul J. Steinhardt y Abraham Loeb (en adelante ISL) defienden la idea de una cosmología de rebote, como propusieron Steinhardt y otros en 2001. Concluyen con la insólita afirmación de que la inflación «no puede ser evaluada mediante el método científico» y sostienen que algunos de quienes la aceptan han propuesto «deshacerse de una de las propiedades definitorias [de la ciencia]: la verificabilidad empírica», promoviendo en su lugar «algún tipo de ciencia no empírica». No tenemos la menor idea de a qué científicos se refirieren. Son varias las afirmaciones del artículo con las que no estamos de acuerdo, pero en esta carta nos centraremos en nuestra categórica oposición a sus aserciones sobre la verificabilidad empírica de la cosmología inflacionaria.

Resulta indisputable que la inflación se ha convertido en el paradigma dominante en cosmología. Una gran cantidad de científicos de todo el mundo han investigado arduamente durante años distintos modelos inflacionarios y han comparado sus predicciones con las observaciones empíricas. Según la base de datos de física de altas energías INSPIRE, hoy existen más de 14.000 artículos en la bibliografía científica, escritos por más de 9000 científicos, que contienen los términos «inflación» o «inflacionario» en sus títulos o resúmenes. Al afirmar que la cosmología inflacionaria está fuera del método científico, ISL no solo echan por tierra la investigación de todos los firmantes de esta carta, sino también la de un importante contingente de la comunidad científica. Por otra parte, como ha quedado claro gracias al trabajo de varias e importantes colaboraciones internacionales, la inflación no solo es verificable, sino que ha sido sometida a un gran número de pruebas y, hasta la fecha, las ha superado todas.

La inflación no constituye una única teoría, sino más bien una clase de modelos basados en principios similares. Por supuesto, nadie piensa que todos ellos sean correctos, así que la pregunta pertinente es si existe al menos uno que parezca estar bien motivado en términos de la física de partículas subyacente y que describa de manera correcta las propiedades observables de nuestro universo. Esta situación es muy parecida a la que tuvo lugar durante el desarrollo del modelo estándar de la física de partículas, cuando se exploraron diferentes modelos en teoría cuántica de campos en busca de uno que encajase con todos los experimentos.

Aunque en principio existe un amplio espectro de modelos inflacionarios que podríamos examinar, hay una clase muy simple (en términos técnicos, los de «un solo campo que rueda lentamente» [*single-field slow-roll*]) que ofrecen predicciones muy similares para la mayoría de las cantidades observables: predicciones que fueron enunciadas con claridad hace decenios. Estos modelos inflacionarios «estándar» constituyen una clase bien definida y que ha sido estudiada de manera exhaustiva. (ISL han expresado vehementes opiniones sobre cuáles de esos modelos son a su juicio los más simples, pero la simplicidad es subjetiva, y no vemos ninguna razón para restringirse a una subclase tan pequeña.) Algunos de esos modelos han sido descartados por datos empíricos precisos, lo que forma parte del deseable proceso de usar las observaciones para reducir el conjunto de modelos viables. Sin embargo, sigue habiendo numerosos modelos en esta misma clase que resultan muy satisfactorios desde el punto de vista empírico.

Los modelos inflacionarios estándar predicen que el universo debería tener una densidad de masa igual a la crítica (es decir, una geometría plana) y anticipan también las propiedades estadísticas de las pequeñas fluctuaciones que motean el fondo cósmico de microondas (CMB). En primer lugar, dichas fluctuaciones deben ser casi «invariantes de escala», lo que significa que han de mostrar prácticamente la misma intensidad en todas las escalas angulares. En segundo lugar, deben ser «adiabáticas», lo que quiere decir que las perturbaciones son las mismas para todas las componentes: la materia ordinaria, la radiación y la materia oscura fluctúan al unísono. En tercer lugar, han de ser «gaussianas»,

una afirmación sobre los patrones estadísticos de las regiones relativamente brillantes y oscuras. Y en cuarto y último lugar, dichos modelos hacen predicciones sobre los modos de polarización del CMB, los cuales pueden dividirse en dos: los E y los B. Las predicciones con respecto a los modos E resultan muy similares para todos los modelos estándar, mientras que las referentes los modos B (los cuales constituyen una medida de la radiación gravitatoria presente en el universo temprano) varían significativamente de unos a otros.

El hecho destacable es que, desde los resultados del satélite COBE en 1992, numerosos experimentos han confirmado que estas predicciones (junto con otras muchas demasiado técnicas para mencionarlas aquí) describen con precisión nuestro universo. La densidad media de masa en el cosmos se ha medido con una precisión cercana al medio punto porcentual y concuerda a la perfección con la predicción inflacionaria. (Cuando se propuso la inflación, la incertidumbre en la densidad media de masa era de al menos un factor tres, por lo que se trata de un éxito espectacular.) Las fluctuaciones del CMB han sido medidas con gran detalle por otros dos satélites, WMAP y Planck, así como por numerosos experimentos terrestres y en globos. Todos ellos han confirmado que, en efecto, las fluctuaciones primordiales son casi invariantes de escala, así como adiabáticas y gaussianas con muy buen grado de aproximación, justo como predijeron (por adelantado) los modelos inflacionarios estándar. Aún no hemos observado los modos B de polarización, lo cual es compatible con muchos de los modelos estándar, aunque no con todos; mientras que los modos E se ajustan también a las predicciones. En 2016, el equipo de la misión Planck, una colaboración formada por unos 260 científicos, resumió sus conclusiones diciendo que «los resultados de Planck ofrecen pruebas contundentes a favor de los modelos inflacionarios simples». Así que, si la inflación no es verificable, como pretenden hacernos creer ISL, ¿por qué ha sido sometida a tantas pruebas y ha cosechado éxitos tan notables?

A pesar del éxito inequívoco de los modelos inflacionarios, ISL insisten en que la inflación no es verificable. (Nos desconcierta que afirmen que no deberíamos tener en cuenta los rotundos éxitos observacionales de la inflación, ¡al tiempo que acusan a sus partidarios de abandonar la ciencia empírica!) Argumentan, por ejemplo, que no lo es porque resulta posible modificar sus predicciones variando las condiciones iniciales o la forma de la curva que describe la densidad de energía inflacionaria. Pero la verificabilidad de una teoría no requiere en modo alguno que todas sus predicciones sean independientes de la elección de los parámetros. Si semejante independencia con respecto a los parámetros fuera un requisito, también tendríamos que cuestionar la validez del modelo estándar, con su contenido de partículas y 19 o más parámetros determinados empíricamente.

Un aspecto importante es que los modelos inflacionarios estándar *podrían no haber superado alguna de las pruebas empíricas mencionadas arriba, pero no ha ocurrido así*. ISL escriben que «una teoría fallida se torna cada vez más inmune al experimento a medida que la vamos enmendando», dando a entender que esto guarda algún vínculo con la inflación. Pero, a pesar de esa retórica, constituye una práctica habitual de la ciencia empírica modificar una teoría a medida que nuevos datos salen a la luz; igual que, por ejemplo, el modelo estándar de la física de partículas se fue acomodando para dar cuenta de los quarks y leptones que iban apareciendo. Entretanto, en el caso de la cosmología inflacionaria, hasta ahora no ha sido necesario ir más allá de la clase de modelos estándar.

ISL afirman también que la inflación no es verificable porque conduce a la inflación eterna y a un multiverso. Sin embargo —y aunque la posibilidad del multiverso constituye una activa área de estudio—, esa idea no interfiere en absoluto con la verificabilidad empírica de la inflación. Si la noción del multiverso es válida, entonces habría que entender el modelo estándar de la física de partículas como una descripción de la física en nuestro universo visible; y, del mismo modo, los modelos inflacionarios que estamos refinando con las observaciones recientes describirían las formas en que la inflación pudo ocurrir en nuestra región particular del universo. Ambas teorías permanecerían de lleno en el dominio de la ciencia empírica: los científicos todavía podrían comparar los nuevos datos (obtenidos a partir de observaciones astrofísicas y experimentos de física de partículas) con las predicciones precisas y cuantitativas de los modelos concretos de inflación y física de partículas. Nótese que esta cuestión es diferente del objetivo, más ambicioso, de desarrollar un marco teórico capaz de predecir, sin usar datos observacionales, qué modelos de inflación y de física de partículas deberían describir nuestro universo visible.

Como cualquier otra teoría científica, la inflación no tiene por qué abordar *todas* las preguntas imaginables. Los modelos inflacionarios, al igual que todas las teorías científicas, se basan en un conjunto de suposiciones, cuya compresión podría requerir apelar a una teoría más profunda. Sin embargo, esto no socava el éxito de los modelos inflacionarios. La situación es similar a la de la teoría tradicional de la gran explosión: el hecho de que esta dejara varias cuestiones sin resolver, como por qué el universo presenta una densidad de masa casi igual a la crítica, o cuál es el origen de las estructuras cósmicas (problemas que la inflación resuelve de manera elegante), no socava sus muchas predicciones certeras, como la referente a las abundancias relativas de los elementos químicos ligeros. Que nuestro conocimiento del universo sea todavía incompleto no constituye ninguna razón para ignorar los impresionantes éxitos *empíricos* de los modelos inflacionarios estándar.

A lo largo de sus más de 35 años de existencia, la teoría inflacionaria se ha convertido poco a poco en el principal paradigma cosmológico para describir las primeras etapas de la evolución del universo y la formación de su estructura a gran escala. Nadie dice que la inflación haya quedado probada; las teorías científicas no se demuestran del mismo modo que los teoremas matemáticos. Pero, con el paso del tiempo, aquellas que resultan exitosas van consolidándose más y más gracias a comprobaciones experimentales cada vez mejores y a los desarrollos teóricos. Esto es lo que ha sucedido con la inflación. El avance continúa gracias al esfuerzo entusiasta de numerosos científicos que han elegido participar en esta vibrante rama de la cosmología.

¡La ciencia empírica sigue gozando de buena salud!

Alan H. Guth
Instituto de Tecnología de Massachusetts

David I. Kaiser
Instituto de Tecnología de Massachusetts

Andrei D. Linde
Universidad Stanford

Yasunori Nomura
Universidad de California en Berkeley

Charles L. Bennett
Universidad Johns Hopkins, misiones WMAP y COBE

J. Richard Bond
Universidad de Toronto, Instituto Canadiense de Investigación Avanzada, Instituto Canadiense de Astrofísica Teórica y colaboración Planck

François Bouchet
Instituto de Astrofísica de París, CNRS y Universidad de La Sorbona, consorcio del instrumento HFI del satélite Planck y equipo científico de la misión Planck

Sean Carroll
Instituto de Tecnología de California

George Efstathiou
Universidad de Cambridge y equipo científico de la misión Planck

Stephen Hawking
Universidad de Cambridge

Renata Kallosh
Universidad Stanford

Eiichiro Komatsu
Instituto Max Planck de Astrofísica y colaboración WMAP

Lawrence M. Krauss
Universidad Estatal de Arizona

David H. Lyth
Universidad de Lancaster

Juan Maldacena
Instituto de Estudios Avanzados de Princeton

John C. Mather
Centro Goddard de Vuelos Espaciales de la NASA y misión COBE

Hiranya Peiris
Colegio Universitario de Londres, Centro Oskar Klein de Física de Cosmopartículas, colaboración WMAP y colaboración Planck

Malcolm Perry
Universidad de Cambridge

Lisa Randall *Universidad Harvard*

Martin Rees
Universidad de Cambridge

Misao Sasaki *Universidad de Kioto*

Leonardo Senatore *Universidad Stanford*

Eva Silverstein *Universidad Stanford*

George F. Smoot III
Universidad de California en Berkeley y misión COBE

Alexei Starobinsky
Instituto Landau de Física Teórica, Academia Rusa de Ciencias

Leonard Susskind *Universidad Stanford*

Michael S. Turner *Universidad de Chicago*

Alexander Vilenkin *Universidad Tufts*

Steven Weinberg
Universidad de Texas en Austin

Rainer Weiss
Instituto de Tecnología de Massachusetts, misión COBE y LIGO

Frank Wilczek
Instituto de Tecnología de Massachusetts

Edward Witten *Instituto de Estudios Avanzados de Princeton*

Matías Zaldarriaga *Instituto de Estudios Avanzados de Princeton*

Responden los autores: *Sentimos un gran respeto por los científicos que han firmado la réplica a nuestro artículo. Pero su respuesta nos ha decepcionado por cuanto pasa por alto nuestro punto clave: las diferencias entre la teoría inflacionaria que una vez se creyó posible y la teoría tal y como la entendemos hoy. La afirmación de que la inflación ha sido confirmada se refiere a la teoría obsoleta, antes de que entendiésemos sus problemas fundamentales. Creemos firmemente que en una comunidad científica saludable hay lugar para el desacuerdo respetuoso y, por tanto, rechazamos la idea de que, al señalar los problemas de la inflación, estemos echando por tierra el trabajo de todos aquellos que la desarrollaron y que hicieron posible efectuar mediciones precisas del universo.*

Históricamente, las ideas sobre la inflación se basaron en una serie de malentendidos. No se entendía que el resultado de este proceso era extremadamente sensible a las condiciones iniciales, y tampoco que la inflación conduce en líneas generales a una inflación eterna y, como consecuencia, a un multiverso; es decir, a una variedad infinita de resultados. Los artículos que sostienen que la inflación predice esto o aquello hacen caso omiso de estos problemas.

Nuestro argumento defiende que deberíamos estar hablando sobre la versión contemporánea de la inflación, con todas sus imperfecciones, no sobre una reliquia caduca. Como es lógico, si el resultado de la inflación es extremadamente sensible a unas condiciones iniciales que todavía no entendemos, como admiten los firmantes, entonces no podemos determinar su resultado. Y si la inflación produce un multiverso en el que, por emplear una antigua cita de uno de los autores (Guth), «cualquier cosa que pueda suceder acabará sucediendo», no tiene absolutamente ningún sentido hablar de predicciones. A diferencia de lo que ocurre con el modelo estándar de la física de partículas, cualquier modelo inflacionario produce, incluso después de fijar todos sus parámetros, una variedad infinita de resultados, ninguno de los cuales resulta preferido sobre ningún otro. Esto hace a la inflación inmune ante cualquier prueba observacional. Para más detalles, véase nuestro artículo de 2014 «Inflationary schism after Planck 2013» (*disponible en arxiv.org/abs/1402.6980*).

Somos tres pensadores independientes que representamos a diferentes generaciones de científicos. La intención de nuestro artículo no era reabrir viejos debates, sino discutir las implicaciones de las observaciones recientes y señalar algunas cuestiones no resueltas, las cuales ofrecen oportunidades para que una nueva generación de cosmólogos produzca un impacto duradero. Esperamos que los lectores vuelvan a revisar los párrafos finales de nuestro artículo. En ellos nos posicionábamos en contra del principio de autoridad y abogábamos por reconocer abiertamente las limitaciones de las ideas actuales, redoblar los esfuerzos para solucionar sus problemas y explorar con la mente abierta diversas opciones que los evitan por completo. Seguimos apoyando estos principios.

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:

PRENSA CIENTÍFICA, S. A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.



EL RÍO YAVARÍ, en la frontera entre Perú y Brasil, es uno de los afluentes del Amazonas. Es probable que hace millones de años la cuenca occidental del Amazonas estuviese inundada por el mar.

INGO ARNDT, GETTY IMAGES

GEOLOGÍA

La atlántida amazónica

Nuevas pruebas sedimentarias sugieren que, hace millones de años, una parte de la vasta cuenca fluvial del Amazonas estuvo cubierta por el mar

Hace tiempo que los científicos se las ven y se las desean para resolver uno de los grandes misterios biogeográficos de nuestro planeta: ¿cómo modeló la historia geológica del Amazonas su magnífico ecosistema? Ahora, nuevas pruebas sedimentarias procedentes del este de Colombia y del noroeste de Brasil apuntan a que, al menos dos veces en el pasado, parte de la enorme cuenca estuvo cubierta por aguas marinas. La Amazonia es famosa por su río, pero este solo empezó a fluir hace nueve millones de años. Existen diversas ideas sobre cómo debió de ser ese paisaje antes: una pluviselva inundada, un inmenso lago de agua dulce o parte de una red de corrientes con forma de abanico que cubría el continente. Descubrirlo resulta fundamental para entender cómo se generó la asombrosa biodiversidad de la región.

Según una teoría, las aguas marinas inundaron la Amazonia occidental en el Mioceno, lo que pudo haber creado un entorno apto para que evolucionasen numerosas especies nuevas. Sin embargo, aunque los investigadores están de acuerdo en que algunas partes de la Amazonia estuvieron inundadas en el pasado, no existe un consenso sobre los mecanismos ni sobre el tamaño de la inundación.

Un estudio publicado este año en *Science Advances* sostiene que la Amazonia occidental se inundó durante dos intervalos separados, uno a principios y otro a mediados del Mioceno (hace 18 y 14 millones de años, respectivamente). Carlos Jaramillo, experto en polen del Instituto Smithsoniano de Investigación Tropical; Jaime Escobar, paleoclimatólogo

de la Universidad del Norte, en Colombia, y sus colaboradores defienden que el Caribe abrió brechas en la costa sudamericana por lo que hoy son Venezuela y Colombia y que cubrió inmensas zonas de la antigua Amazonia con una lengua de agua salada que se internó en el continente. A medida que el agua avanzaba, fue perdiendo profundidad y se convirtió en un ecosistema marino salobre, luego en una región acuática de transición y, por último, en una zona seca. Los testigos de sedimentos indican que, en la actual Colombia, las inundaciones duraron 900.000 y 3.700.000 años, respectivamente, mientras que en la Amazonia occidental, más tierra adentro, se prolongaron unos 200.000 y 400.000 años.

En su trabajo, los investigadores describen los indicios que ofrecen los testigos de sedimentos sobre esas inundaciones marinas. Los macrofósiles más interesantes, encontrados en un testigo de varios centímetros de ancho extraído en el pozo Saltarín, en la región colombiana de Los Llanos, son un diente de tiburón (posiblemente un tiburón de puntas negras o un tiburón martillo) y un estomatópodo, o mantis marina (crustáceos que suelen cavar madrigueras en el lecho arenoso de los mares tropicales). «Que se haya encontrado un diente de tiburón en un testigo tan estrecho indica que tiene que haber muchos más, lo que apunta a lo extensas que fueron esas incursiones de agua salada», explica Jaramillo. «La pluviselva amazónica es un sistema muy dinámico y no tan viejo como se creía. Hoy cubre una superficie tan grande como la de EE.UU., pero hace 14 millones de años era mar.»

Los nuevos hallazgos coinciden con las investigaciones de la geóloga y experta en pólenes Carina Hoon, de la Universidad de Ámsterdam y de la Universidad Regional Amazónica Ikiam, en Ecuador. Hoom, que no ha participado en el estudio de *Science Advances*, determinó hace poco la edad del río. «En conjunto, las pruebas de una incursión marina en la Amazonia son realmente abrumadoras», señala, y añade que estas abren el camino a nuevas investigaciones sobre la manera en que aquel entorno marino influyó en la evolución de la biodiversidad de la zona.

Otros expertos son más cautelosos. «El artículo ofrece pruebas, importantes aunque no absolutamente concluyentes, de las incursiones marinas», dice Christopher Dick, biólogo evolutivo de la Universidad de Míchigan que estudia la diversificación vegetal en varias partes del Amazonas. «Pero la mayoría de los demás escenarios siguen siendo posibles, incluso a la luz de estos nuevos datos.»

Jaramillo y sus coautores no llegan a afirmar que las incursiones de agua marina del Mioceno fuesen la única razón de la biodiversidad del Amazonas, pero sí creen que varios de los géneros de plantas existentes en la actual pluviselva podrían remontarse a especies que vivían en bosques permanentemente inundados. Dick discrepa. Desde la perspectiva de la botánica terrestre, argumenta, costaría demostrar que la actual diversidad de especies derive de esas inundaciones. Todo apunta a que el trabajo detectivesco para desentrañar el pasado de este imponente río y su selva continuará durante largo tiempo.

—*Angela Posada-Swafford*

Primera inundación, hace 17,8 millones de años



Segunda inundación, hace 13,7 millones de años



VARIOS TESTIGOS SEDIMENTARIOS extraídos en el este de Colombia y el noroeste de Brasil han sugerido la posibilidad de que, hace millones de años, lo que hoy es la pluviselva amazónica estuviese inundada por agua de mar. Estos mapas muestran la máxima extensión inferida de las inundaciones en sus dos períodos: hace entre 18,1 y 17,2 millones de años y hace entre 16,1 y 12,4 millones de años. La reconstrucción de la zona por debajo del borde meridional del área estudiada se basa en testigos de un trabajo de 2010, si bien no cubre el período completo abarcado por los nuevos testigos.



SOSTENIBILIDAD

Bosques en declive

El planeta está perdiendo territorios vírgenes que son clave para mantener la salud de los ecosistemas

La humanidad ha dejado su huella en todo el planeta: ni un solo ecosistema permanece del todo virgen. Pero algunos han quedado menos afectados que otros. Y la medida en que la Tierra logra proveer hábitats aptos para la flora y la fauna, secuestrar carbono atmosférico y regular el ciclo del agua dulce depende de la extensión de las regiones poco alteradas. Esos territorios, donde la influencia humana sigue escaseando lo bastante como para ser fácilmente detectable desde un satélite, representan un objetivo primordial para la conservación. Mediante imágenes de satélite, un grupo de investigadores ha cartografiado el declive mundial acaecido entre 2000 y 2013 de esos «paisajes forestales inalterados», definidos como un mosaico de bosques y ecosistemas naturales sin árboles con una extensión mínima de 500 kilómetros cuadrados. Cerca de la mitad de la superficie del planeta ocupada por este tipo de paisajes se halla en los trópicos, mientras que un tercio radica en los bosques boreales de Norteamérica y Eurasia. La explotación maderera, la agricultura, la minería y los incendios son los culpables del retroceso, como se ha expuesto el pasado enero en *Science Advances*. ¿El dato positivo? Los territorios que gozan de protección legal, como los parques nacionales, tienden a permanecer intactos.

—*Jason G. Goldman*

EN CIFRAS

12,8 millones

de kilómetros cuadrados Extensión total de los paisajes forestales inalterados en 2000, una cifra equivalente a la tercera parte de la superficie lunar.

Casi 1 millón

de kilómetros cuadrados Área aproximada perdida de paisajes forestales inalterados del 2000 al 2013, una superficie similar a la de Egipto

65

Número de países que acogían como mínimo un paisaje forestal inalterado en el 2000.

19

Número de países que perderán todos sus paisajes forestales inalterados en 60 años si la degradación continúa al ritmo actual.

FUENTE: «MIOCENE FLOODING EVENTS OF WESTERN AMAZONIA», POR CARLOS JARAMILLO ET AL., EN *SCIENCE ADVANCES*, VOL. 3, N.º 5, ART. E1601693, 3 DE MAYO DE 2017; MAPPING SPECIALISTS (*mapas*); FUENTE: «THE LAST FRONTIERS OF WILDERNESS: TRACKING LOSS OF INTACT FOREST LANDSCAPES FROM 2000 TO 2013», POR PETER POTAPOV, EN *SCIENCE ADVANCES*, VOL. 3, N.º 1, ART. N.º E1600821; 4 DE ENERO DE 2017; GETTY IMAGES (*árboles*)

GENÉTICA

El refugio familiar del ratón

Un único gen podría regir la construcción del nido en los ratones

Algunos pequeños roedores campestres construyen nidos de hierba para mantener abrigada y segura a su camada. Otros no son tan esmerados y crean hogares más precarios. En fecha reciente se ha descubierto un gen que regula la construcción del nido, uno de los pocos que se sabe que influye en la conducta parental de los mamíferos, incluida la especie humana.

En un estudio publicado en *Nature*, el genetista Andrés Bendesky, de la Universidad Harvard, y sus colaboradores trabajaron con dos especies de roedores genéticamente afines pero con un comportamiento procreador dispar: una subespecie del ratón playero (*Peromyscus polionotus subgriseus*), que es monógamo, y el ratón ciervo (*Peromyscus maniculatus*), que es polígamo. Ambos cuidan también a sus crías de modo distinto. Los primeros construyen nidos más elaborados que sus congéneres promiscuos y dedican más tiempo a acicalar y acurrucar a sus crías y a vigilar que no se extravíen del nido en sus primeras andanzas. En el estudio, estos comportamientos parentales no dependieron del cuidado recibido en su infancia: cuando las crías de una especie eran acogidas por los progenitores de otra, en la edad adulta seguían mostrando los mismos hábitos de crianza de sus progenitores biológicos y no los de los adoptantes.

En busca de la base genética de tales conductas, Bendesky y sus colaboradores cruzaron las dos especies de ratones en dos ocasiones hasta obtener casi 800 nietos. Entre los descendientes de la segunda generación destacó un gen vinculado con la construcción del nido. El gen regula la vasopresina, hormona que, como la oxitocina, tiene un efecto acusado sobre los comportamientos sociales y de apego de los mamíferos y las aves. Los investigadores prosiguieron con dos experimentos: en uno inyectaron vasopresina en el cerebro de los progenitores de ambas especies silvestres; en el otro, manipularon genéticamente las neuronas de la vasopresina en el cerebro de ratones domésticos (*Mus musculus*) para excitarlas. Ambos grupos de ratones crearon nidos precarios, lo cual apunta a que la vasopresina y el gen responsable de su síntesis desempeñan una función esencial en su construcción.



CUIDADOS PARENTALES: El ratón playero (*Peromyscus polionotus subgriseus*) demuestra ser un buen padre.

Los resultados sorprendieron a Oliver Bosch, biólogo de la Universidad de Ratisbona, ajeno al nuevo estudio. En su propia investigación con ratas y topillos, la vasopresina promovió ciertas conductas maternales. Puede que la hormona cumpla funciones diferentes antes y después del nacimiento de las crías, dependiendo de si los progenitores se están preparando para su llegada o cuidan de ellos. «Tal vez permanezca reprimida al inicio, para posteriormente surtir efecto y fomentar el comportamiento maternal», opina. No es extraño, pues, que el proceder de los ratones nos confunda.

—*Andrea Marks*

NEUROCIENCIA

La sustancia de los sueños

La identificación de una zona activa en el cerebro durmiente abre una ventana al conocimiento de la consciencia

«Dormir, acaso soñar.» Shakespeare tal vez no se refería exactamente a nuestros viajes nocturnos a otro mundo, pero eso no resta en absoluto misterio ni trascendencia al fenómeno de los sueños. Investigaciones recientes están ampliando nuestros conocimientos y ofreciendo nuevas perspectivas sobre la consciencia.

El sueño proporciona a la ciencia un modo de estudiar la consciencia en todas sus diversas formas, desde los sueños vívidos hasta la ausencia de toda percepción, asegura el neurocientífico Benjamin Baird. Cuando alguien echa una cabezada es posible aislar sus experiencias conscientes de la influencia confusa de los sentidos.

En un intento reciente por investigar el cerebro durmiente, Baird y el experto en la consciencia Giulio Tononi, ambos de la Universidad de Wisconsin en Madison, y sus colaboradores colocaron mallas de electrodos sobre el cuero cabelludo de personas que dormían para registrar sus ondas cerebrales mediante electroencefalografía de alta densidad. A intervalos frecuentes despertaban a los voluntarios para preguntarles si habían soñado y, en tal caso, que describieran sus ensueños. Uno de sus experimentos recopiló en total casi 200 relatos de 32 participantes, y un segundo añadió unos 800 más de un grupo más pequeño que había sido instruido para describirlos.

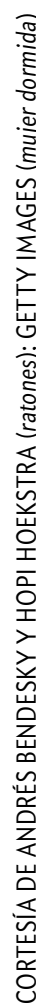
El equipo descubrió una zona crítica en la parte posterior de la corteza cerebral, cerca de la nuca, donde las ondas de baja frecuencia (vinculadas con la inconsciencia) disminuían y la actividad de alta frecuencia aumentaba cuando las personas referían haber estado soñando, fuera o no durante la fase de movimientos oculares rápidos, o REM. (A pesar de una creencia habitual, puede soñarse tanto en el transcurso de la fase REM como en la no-REM, la fase lenta del sueño.) Los hallazgos se han descrito en *Nature Neuroscience*.

En un tercer experimento con siete individuos, los expertos predijeron con una precisión del 87 por ciento si los participantes estaban soñando. Además, la actividad de las ondas en ciertas regiones del cerebro apareció vinculada con contenidos concretos del sueño: lugares, caras y discurso. Esas mismas zonas permanecen activadas durante la vigilia. «En el estudio no intentamos predecir el contenido [de los sueños]», matiza Baird, pero afirma que sería interesante intentarlo.

La estrategia seguida por los investigadores supone «un paradigma realmente fresco y novedoso», asegura Christof Koch, presidente y director científico del Instituto Allen de Neurociencia, en Seattle, que no ha participado en el trabajo. Descubrir que la actividad onírica estaba desplazada hacia la parte posterior del cerebro causó sorpresa, asegura, porque existe la idea generalizada de que la consciencia emana de las regiones frontoparietales. Una limitación del estudio es la demora entre el despertar del individuo y la rememoración del sueño. Koch afirma que, a la larga, «pretendemos acercarnos cada vez más a la experiencia en sí».



—*Tanya Lewis*



CORTESÍA DE ANDRÉS BENDESKY Y HOPI HOEKSTRA (*ratones*); GETTY IMAGES (*mujer dormida*)

ETOLOGÍA

Osos bailones

Los movimientos de torsión que realizan con las patas dejan mensajes olorosos en las huellas

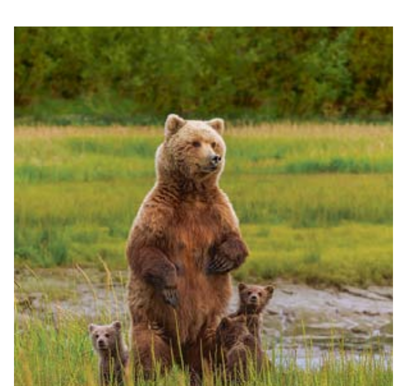
Los biólogos que estudian los osos saben desde hace decenios que estos carnívoros exhiben a veces una peculiar forma de caminar que ha sido descrita con nombres tan variopintos como «el pavoneo del luchador de sumo», «los andares de vaquero» o, sencillamente, «la danza osuna». Numerosos investigadores han conjeturado sobre su razón de ser, pero por fin un estudio aporta indicios sólidos que explicarían semejante conducta.

A cada paso, el oso restriega con fuerza sus zarpas sobre el suelo, como si apagara una colilla. En ocasiones lo hace sobre las pisadas dejadas por otros congéneres después de husmearlas a conciencia. Algunos hemos comparado esas huellas colectivas con autopistas porque con el tiempo se vuelven muy transitadas.

«Todos sospechábamos que había algo en las huellas», explica Agnieszka Sergiel, bióloga del Instituto para la Conservación de la Naturaleza de la Academia Polaca de Ciencias y una de las autoras del estudio, publicado hace poco en *Scientific Reports*. «Pero nadie lo había investigado formalmente.» Ella y sus colaboradores se preguntaban si los plantígrados dejan su olor a través de las glándulas alojadas en sus zarpas mientras caminan como medio de comunicación.

El equipo de Sergiel examinó un par de osos pardos y comprobó que, en efecto, albergan glándulas sudoríparas, lo que hace pensar que las pisadas dejan un rastro oloroso. También descubrieron 26 compuestos volátiles (seis exclusivamente masculinos) en el sudor de las patas, lo cual indica que los osos podrían usar el aroma para averiguar el sexo de los que les han precedido en sus pasos. Sergiel asegura que las huellas son como buzones, aunque sus mensajes siguen siendo una incógnita.

—*Jason G. Goldman*





FIBRAS «BORROSAS»: Un nuevo material compuesto fabricado con nanotubos de carburo de silicio (*inserto*) podría aumentar la resistencia de los cohetes a las altas temperaturas.

MATERIALES

Cohetes calientes

Un nuevo material resistente a las altas temperaturas abre la puerta a la construcción de cohetes más potentes

En el interior de los cohetes actuales se alcanzan temperaturas de 1600 grados Celsius: suficientes para derretir el acero. Sin embargo, los cohetes futuros tendrán que soportar temperaturas aún mayores, pues ello aumenta la eficiencia en el consumo de combustible, genera un empuje mayor y permite transportar cargas más pesadas, cualidades esenciales en los vuelos a Marte y en la carrera hacia una aeronáutica más avanzada.

Con ese objetivo en mente, los ingenieros han investigado materiales compuestos resistentes y ligeros, fabricados con finísimas fibras de carburo de silicio (mucho más finas que un cabello humano) inmersas en material cerámico. La razón se debe a que el carburo de silicio puede soportar hasta 2000 grados, la temperatura que se desea que alcancen los futuros impulsores.

Los materiales compuestos actuales se fabrican apilando «alfombrillas» tejidas con fibra de carburo de silicio y rellenando el espacio entre ellas con una cerámica porosa. Sin embargo, pueden quebrarse debido a las altas presiones que se alcanzan en los cohetes, ya que las fibras se deslizan unas sobre otras y se salen de la cerámica.

Ahora, un grupo de científicos de la Universidad Rice y del Centro de Investigación Glenn de la NASA ha logrado un posible avance: fibras de carburo de silicio «borrosas», cuya superficie recuerda a una versión microscópica del velcro. Descritas hace poco en *Applied Materials & Interfaces*, parece menos probable que tales fibras acabasen deslizándose o escapando del medio cerámico, ya que la maraña que forman las mantendría apretadas.

Para fabricarlas, los investigadores primero hicieron crecer nanotubos de carbono rizados, los cuales sobresalen de la superficie del carburo de silicio como pelo ensortijado. Luego los sumergieron en un polvo ultrafino de silicio y los calentaron, lo que convierte los nanotubos de carbono en fibras de carburo de silicio. El equipo examinó la resistencia de las fibras insertándolas en un polímero transparente y gomoso, gracias a lo cual pudo comprobar que el nuevo material compuesto era cuatro veces más fuerte que el fabricado con hebras más regulares. Janet Hurst, ingeniera de la NASA y coautora del estudio, explica que el equipo quiere ahora probar las fibras en un medio cerámico, así como usar un recubrimiento borroso de nanotubos de nitruro de boro, ya que este es fuerte y protege a las fibras de la dañina exposición al oxígeno.

Las fibras de carburo de silicio son resistentes a lo largo de toda su longitud, pero pueden partirse a lo ancho si están sometidas a altas presiones. Sin embargo, las nuevas fibras sí aguantarían, ya que su esponjosa estructura ayudaría a repartir la tensión y disiparla, explica Steven Suib, director del Instituto de Ciencia de Materiales de la Universidad de Connecticut, quien no participó en la investigación.

—*Prachi Patel*

ART WOLFE, GETTY IMAGES (*osos*); GETTY IMAGES (*transbordador espacial*); AJAYAN RESEARCH GROUP/UNIVERSIDAD RICE (*fibras*)

ROBÓTICA

El ayudante robótico de la abuela

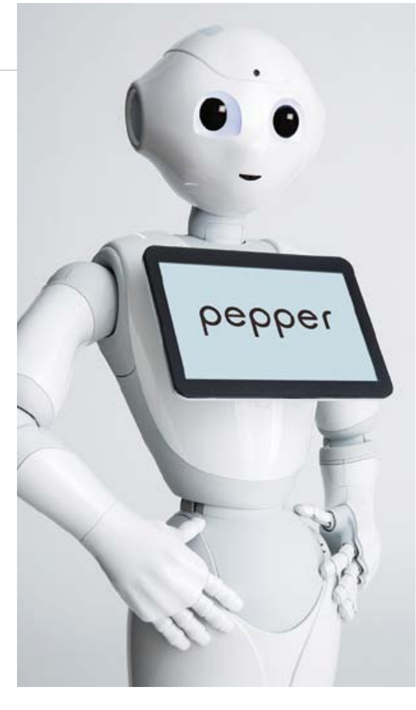
Las máquinas capaces de entender señales sociales humanas allanan el camino para fabricar asistentes robóticos para ancianos

Los robots ya realizan numerosas tareas que hasta hace poco eran exclusivamente humanas, desde pasar la aspiradora hasta practicar cirugía. Se espera que pronto puedan también ayudar a enfermos y ancianos. Sin embargo, hasta que no logren discernir e imitar las emociones de manera convincente, su valor como cuidadores será muy limitado. En un esfuerzo por crear máquinas más «amistosas», se están desarrollando ayudantes robóticos que sepan entender las señales sociales y reaccionar mejor a ellas.

A finales de 2016, IBM y la Universidad Rice presentaron el Asistente Robótico Multipropósito para Ancianos (MERA), una versión adaptada del robot Pepper, de la compañía japonesa SoftBank Robotics. Pepper, un androide de color marfil con la estatura de un niño de siete años, puede detectar emociones humanas y responder a ellas por medio de indicaciones vocales y expresiones faciales, por lo que ya ha sido usado como ayudante amistoso en tiendas y hogares japoneses. MERA, diseñado expresamente como acompañante doméstico de ancianos, graba y analiza vídeos de la cara de una persona y calcula signos vitales, como el ritmo cardíaco y respiratorio.

Gracias a la tecnología del habla con que está equipado, desarrollada originalmente para Watson (la célebre máquina de IBM que en 2011 ganó el concurso de televisión *Jeopardy!*), MERA puede conversar con un paciente y responder preguntas sobre salud. «Lo tiene todo junto en un adorable ser», asegura Susann Keohane, fundadora del Laboratorio de Investigaciones sobre la Vejez en Casa, de IBM.

Por su parte, la robotista de la Universidad de California del Sur Maja Matarić y sus colaboradores están aplicando una estrategia diferente aunque complementaria al desarrollo de máquinas sociales: robots que aprovechan las dinámicas sociales humanas para ayudar a los ancianos a valerse por sí mismos. «Hemos visto que la gente realmente necesita ayuda con la motivación», explica la investigadora. «Por eso hemos creado el campo de la robótica socialmente asistencial: máquinas que ayudan a las personas mediante una interacción, no física, sino social.» Para los ancianos, esa asistencia puede adoptar múltiples formas, desde guiarlos en la terapia física hasta ayudarlos a socializar con amigos y familiares.



EL ROBOT PEPPER, de SoftBank Robotics, puede entender emociones humanas y responder a ellas. Se ha diseñado una versión de esta máquina para ayudar a las personas mayores.

Matarić y su equipo han puesto a prueba hace poco a Spritebot, un búho verde robot, de unos treinta centímetros de alto, que ayuda a los mayores a jugar con sus hijos o nietos. Los investigadores se percataron de que las personas hablaban más entre sí y jugaban durante más tiempo cuando Spritebot tomaba parte en sus interacciones y las moderaba.

En el futuro, Matarić y sus colaboradores planean emparejar a ancianos con acompañantes robóticos que los animen a practicar hábitos saludables, como caminar más. La investigadora espera que, al estudiar la manera en que las personas interaccionan con estas máquinas a medida que pasa el tiempo, su equipo podrá entender el proceso de formación de hábitos así como la dinámica del vínculo entre seres humanos y robots.

Puede que los robots asistenciales se tornen necesarios debido a una falta de acompañantes humanos para los ancianos. Con todo, Matarić señala que los robots presentan también algunas ventajas intrínsecas sobre sus análogos de carne y hueso: «La paciencia de las máquinas es infinita. Tienen [menos] prejuicios y no se esperan nada».

—*Catherine Caruso*

CORTESÍA DE SOFTBANK ROBOTICS (*robot*); © BETTA PICTURES 2016 (*Marie Curie*)

AGENDA

EXPOSICIONES

Hasta el 16 de julio
The Martian puzzle
Parque de las Ciencias
Granada
www.parqueciencias.com

El amigo de Vermeer: El ojo y la lente
Museo de la Evolución Humana
Burgos
www.museoevolucionhumana.com

OTROS

Cine
Marie Curie
Película biográfica
Dirigida por Marie Noëlle
www.bettapictures.com/marie-curie



Cursos
Universidad de Verano de Teruel
Matemáticas e historia, bioética, botánica, astrofísica, geología, aeronáutica y paleontología
Fundación Antonio Gargallo
Campus de Teruel de la Universidad de Zaragoza
Teruel
fantoniogargallo.unizar.es

3-7 y 10-14 de julio — Actividades
Escuela de verano «Científicos del futuro»
Paleontología para niños de entre 5 y 12 años
Ciudad de las Artes y las Ciencias
Valencia
www.cac.es/escueladeverano

Del 6 al 8 de julio — Talleres
Talleres de ciencia y tecnología
Para jóvenes de entre 12 y 16 años
Centro de Ciencia Principia
Málaga
www.principia-malaga.com

Del 6 al 9 de julio — Festival
Splashdown festival: El festival del cosmos en Asturias
Conferencias, talleres, cine, música y exposición
Centro de La Laboral - Ciudad de la Cultura
Gijón
www.splashdownfestival.space

MATERIALES

Control del grafeno mediante sonido

Un estudio teórico sugiere la posibilidad de utilizar ondas mecánicas para gobernar el comportamiento de los electrones en este material bidimensional. El hallazgo podría encontrar aplicaciones en electrónica y en el diseño de materiales inteligentes

GERARDO GARCÍA NAUMIS

En los últimos años, los materiales con espesor de una sola capa de átomos (bidimensionales) han desencadenado una revolución en nanotecnología. Empezaron a despertar interés en 2004, cuando Andre Geim y Konstantin Novoselov, de la Universidad de Manchester, descubrieron el grafeno, un material formado por monocapas de carbono cuyo hallazgo les valdría en 2010 el premio Nobel de física. Con el tiempo, esta familia se ha ido ampliando con la incorporación del siliceno (monocapas de silicio), el fosforeno (monocapas de fósforo) y dicalcogenuros bidimensionales de metales de transición (MoS_2, $NiSe_2$, etcétera). Todos ellos presentan propiedades electrónicas, ópticas, químicas y mecánicas de gran interés. En particular, se cree que en un futuro podrían reemplazar al silicio en la electrónica. Para ello, la capacidad de controlar el comportamiento de los electrones en estos materiales reviste un interés fundamental.

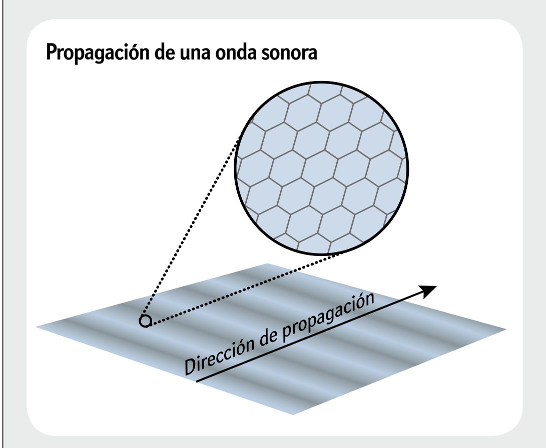
El grafeno ha sido apodado el «material maravilla»: es el mejor conductor conocido de la electricidad y el calor, y combina la ligereza del grafito con la resistencia del diamante. Esta resistencia ante deformaciones mecánicas se explica por la fuerza de los enlaces entre sus átomos de carbono, los cuales se disponen en una estructura hexagonal similar a la de un panal. Un material sólido típico puede estirarse hasta un 3 por ciento de su longitud. El grafeno, en cambio, lo hace hasta un 23 por ciento. Además, dicha deformación es elástica: cuando desaparece la fuerza que la causa, recupera su forma original. Por otro lado, su longitud aumenta de manera proporcional a la fuerza de deformación; es decir, se comporta como un resorte, un sistema mecánico que los físicos conocen muy bien.

Las deformaciones del grafeno generan todo tipo de cambios en el comportamiento de sus electrones. Esto ha llevado a la idea de desarrollar materiales «inteligentes» que, de manera controlada, modifiquen sus propiedades electrónicas según el esfuerzo aplicado. En principio, ello permitiría modular el modo en que absorben la luz, su conductividad eléctrica, térmica y otras cualidades. En inglés se ha acuñado la palabra *straintronics*, que podríamos traducir como «tensiotrónica», para describir el estudio y la aplicación de este fenómeno.

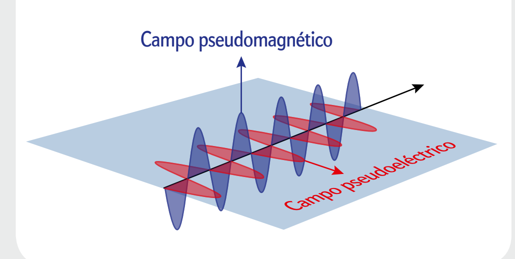
En un trabajo teórico reciente, realizado junto con Maurice Oliva-Leyva, del Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM, hemos analizado el efecto de las ondas sonoras en el comportamiento electrónico del grafeno. Nuestros resultados, publicados en *Journal of Physics: Condensed Matter*, sugieren la posibilidad de emplear deformaciones mecánicas para colimar los electrones del material; es decir, para generar un haz que se propague en una dirección determinada. El hallazgo

DEFORMACIONES MECÁNICAS Y CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS

Cuando un esfuerzo mecánico, como una onda de sonido, se propaga en el grafeno (*arriba*), el comportamiento de los electrones se modifica de manera análoga a como lo haría en presencia de un campo electromagnético (*abajo*). Por esta razón, se dice que estas deformaciones mecánicas inducen «campos pseudoelectromagnéticos». Un estudio reciente ha explotado esta analogía formal para analizar el comportamiento electrónico del grafeno en presencia de ondas sonoras.



Representación esquemática de la propagación de una onda mecánica en una muestra de grafeno. Las zonas grises indican las regiones con mayor densidad de átomos de carbono; es decir, las crestas de la onda sonora en un instante dado. El inserto ilustra la estructura cristalina del grafeno, cuyos átomos se disponen en los vértices de una red hexagonal.



Desde un punto de vista matemático, los efectos generados por la propagación de una onda sonora en el grafeno resultan equivalentes a los que causaría una onda electromagnética en una muestra sin tensiones mecánicas. Esta figura indica cómo serían el campo eléctrico (*rojo*, paralelo a la muestra) y el magnético (*azul*, perpendicular a la muestra) que remedarían los efectos de la onda sonora ilustrada arriba.

ADAPTADO DE: «SOUND WAVES INDUCE VOLKOV-LIKE STATES, BAND STRUCTURE AND COLLIMATION EFFECT IN GRAPHENE», M. O. OLIVA-LEYVA Y G. G. NAUMIS EN *JOURNAL OF PHYSICS: CONDENSED MATTER*, VOL. 28, N.º 2, ART. 025301, ENERO DE 2016

supone un primer paso hacia la manipulación de los electrones en el grafeno mediante ondas sonoras y abre la puerta a varias aplicaciones.

Electrones «relativistas» y ondas electromagnéticas

Los electrones del grafeno se comportan de modo muy distinto al de sus equivalentes en materiales tridimensionales. En un semiconductor tridimensional, como el silicio, la energía de los electrones es proporcional al cuadrado de su velocidad. En el grafeno, en cambio, la energía resulta directamente proporcional a la velocidad de estas partículas. Desde un punto de vista matemático, dicha relación es análoga a la que satisfacen las partículas relativistas; es decir, aquellas que se mueven a velocidades muy próximas a la de la luz.

En general, el comportamiento cuántico de los electrones que avanzan a una velocidad muy cercana a la de la luz queda descrito por la ecuación de Dirac, formulada en 1928 por el físico británico Paul A. M. Dirac. En el caso del grafeno, los electrones obedecen una ecuación de Dirac efectiva. Es importante señalar que nos referimos a ella como «efectiva» porque, en realidad, los electrones del grafeno no se desplazan más rápido que sus homólogos en materiales tridimensionales. Sin embargo, su dinámica sí queda descrita por una ecuación formalmente idéntica a la de Dirac, solo que, en ella, la velocidad de la luz (3×10^8 m/s) debe reemplazarse por la de los electrones en el sólido (del orden de 10^6 m/s).

Allá por el año 2006, casi inmediatamente después del descubrimiento del grafeno, nuestro grupo de investigación comenzó a estudiar el efecto de las ondas electromagnéticas en los electrones del material. Para ello usamos un truco matemático equivalente a «montarse» sobre la onda; es decir, en lugar de plantear el problema desde el sistema de referencia del grafeno, lo hicimos desde el sistema de referencia que avanza junto con la onda. Gracias a esta técnica, la ecuación de Dirac puede resolverse de manera exacta.

Nuestros resultados, publicados en 2008 en *Physical Review B*, indicaban que, en presencia de una onda electromagnética, el grafeno comenzaba a comportarse como un semiconductor; es decir, aparecía un pequeño intervalo de energías «prohibidas» (no accesibles) para los electrones. Cabe recordar que es esta propiedad básica de los semiconductores lo que permite emplearlos para fabricar componentes electrónicos, como transistores. Además, los electrones del grafeno desarrollaban una respuesta no lineal que, entre otros efectos, implicaba que las partículas solo podían avanzar durante la mitad del período de oscilación de la onda electromagnética. Dicho de otro modo, aparecía una corriente semejante a la que fluye a través de un diodo en un circuito de corriente alterna.

Varios de estos efectos se han visto confirmados posteriormente de manera experimental, lo que permite entrever varias aplicaciones técnicas. Entre ellas, la fabricación de circuitos electrónicos con frecuencias de reloj (en esencia, el número de operaciones por segundo) mucho más altas que las de las computadoras actuales.

De las ondas electromagnéticas a las ondas sonoras

En los últimos años, varios trabajos han demostrado que, al aplicar esfuerzos mecánicos al grafeno, el comportamiento de los electrones se modifica de manera similar a como ocurriría en presencia de campos eléctricos y magnéticos. Por esta razón, decimos que tales deformaciones generan «campos pseudoelectromagnéticos». A la vista de este resultado, en el estudio publicado en *Journal of Physics* nos planteamos la posibilidad de aprovechar los resultados obtenidos en el caso de las ondas electromagnéticas y adaptarlos para analizar los efectos de su análogo mecánico: las ondas de sonido.

Nuestros cálculos indicaban que, en presencia de una onda mecánica, los electrones del grafeno comenzarían a avanzar en una dirección privilegiada; en concreto, en la misma en la que se propaga la onda. Esta respuesta ofrece la posibilidad de manipular los electrones del material; por ejemplo, para aumentar la corriente eléctrica en una dirección escogida a voluntad. Y, por supuesto, el mismo efecto puede usarse a la inversa, con el objetivo de detectar esfuerzos mecánicos que se traduzcan en corrientes eléctricas.

Pero, además de este efecto de colimación de los electrones, comprobamos que, de manera similar a lo que ocurría en el caso de una onda electromagnética, comenzaban a aparecer valores no accesibles para la energía de los electrones. Este fenómeno se debe a que la ecuación que describe su comportamiento se reduce a la de un sistema muy simple: un péndulo cuya longitud varía de manera periódica. Un ejemplo famoso de este tipo de movimiento lo hallamos en el botafumeiro de la catedral de Santiago de Compostela. Los *tiraboleiros* tiran de la cuerda que lo sostiene para que este vaya ganando velocidad; pero, para lograrlo, deben escoger cuidadosamente la frecuencia con la que impulsan el incensario. Con los electrones del grafeno sucede algo similar: comienzan a extraer energía de la onda de sonido, pero esta solo se absorberá de manera eficiente si existe una resonancia entre el movimiento de la onda y el de los electrones.

Por último, demostramos que el comportamiento de los electrones quedaba descrito por un «índice de refracción efectivo», análogo al que gobierna la velocidad de la luz en un medio transparente. Ello abre la puerta a controlar la trayectoria y velocidad de los electrones en el grafeno, de modo similar a como ocurre con los fotones en una lente.

Si bien estos resultados son esperanzadores, la manipulación de los electrones del grafeno mediante ondas mecánicas se encuentra todavía en su infancia, tanto en el plano teórico como en el experimental. Aún queda por demostrar en el laboratorio la existencia de los efectos predichos en nuestros estudios y, si así ocurre, extender el modelo a nuevas familias de materiales bidimensionales.

—Gerardo García Naumis
Instituto de Física
Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)

PARA SABER MÁS

Analytic solution for electrons and holes in graphene under electromagnetic waves: Gap appearance and nonlinear effects. F. J. López-Rodríguez y G. G. Naumis en *Physical Review B*, vol. 78, art. 201406, noviembre de 2008.

Sound waves induce Volkov-like states, band structure and collimation effect in graphene. M. O. Oliva-Leyva y G. G. Naumis en *Journal of Physics: Condensed Matter*, vol. 28, n.º 2, art. 025301, enero de 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

Grafeno. Andre K. Geim y Philip Kim en *IyC*, junio de 2008.

Electrónica del grafeno. J. González Carmona, F. Guinea y M.ª Á. Hernández Vozmediano en *IyC*, septiembre de 2010.

Bienvenidos a Planilandia. Vincenzo Palermo y Francesco Bonaccorso en *IyC*, junio de 2017.

BIOLOGÍA VEGETAL

Microorganismos dañinos que estimulan el crecimiento vegetal

En ciertas condiciones de cultivo, algunos fitopatógenos emiten compuestos volátiles beneficiosos para las plantas

JAVIER POZUETA ROMERO, EDURNE BAROJA FERNÁNDEZ Y FRANCISCO JOSÉ MUÑOZ PÉREZ

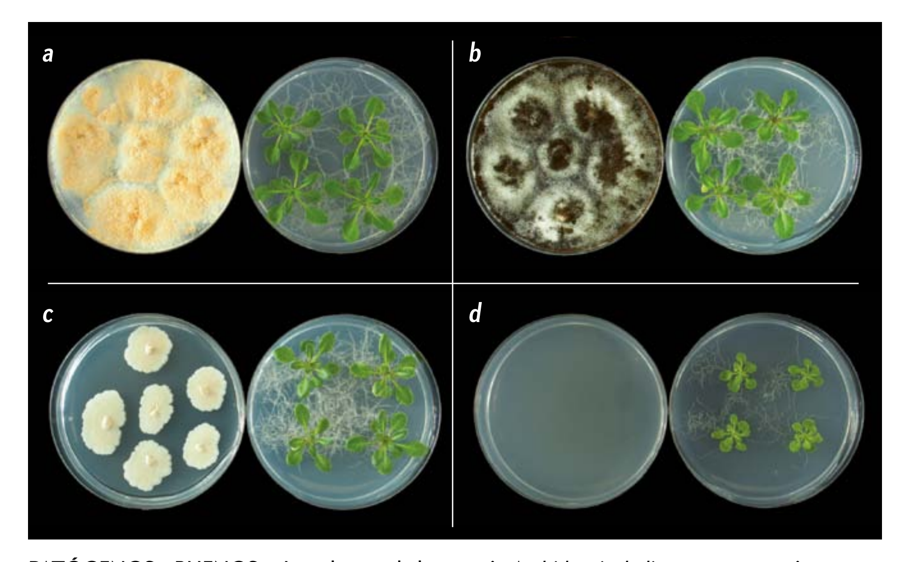
La demanda creciente de alimentos como consecuencia del aumento de la población mundial y la progresiva reducción de las superficies cultivables han llevado a los científicos a buscar nuevos tratamientos que incrementen el rendimiento de los cultivos de manera sostenible y respetuosa con el ambiente. Dichos tratamientos deberían superar y complementar los actuales, basados en la utilización de productos agroquímicos y el fomento de las interacciones entre plantas y microorganismos beneficiosos. En un caso de serendipia, nuestro laboratorio ha descubierto que, en determinadas condiciones, los microorganismos patógenos también producen sustancias que favorecen el crecimiento de las plantas e incrementan el rendimiento de los cultivos.

Respuesta inesperada

Las bacterias y los hongos microscópicos presentes en la filosfera (la superficie de las hojas), la rizosfera (la región del suelo inmediata a las raíces) y la endosfera (el medio interno de la planta) sintetizan sustancias, como lípidos, hormonas, carbohidratos, ácidos nucleicos y proteínas, que regulan procesos relacionados con el crecimiento de la planta. Estos microorganismos emiten también una amplia gama de compuestos volátiles que, a modo de señales, participan en innumerables procesos de comunicación entre ellos y las plantas. Así, las mezclas de compuestos volátiles procedentes de los patógenos microbianos funcionan normalmente como potentes agentes fitotóxicos. Por el contrario, los emitidos por un reducido número de cepas de bacterias y hongos de la rizosfera, típicamente catalogados como beneficiosos, fomentan el crecimiento de las plantas y su resistencia a los patógenos, según demostraron en 2003 Joseph W. Kloepper, Paul P. Paré y sus colaboradores, de la Universidad de Auburn.

Pero, además, investigaciones llevadas a cabo en nuestro laboratorio han demostrado que, de forma inesperada, una gran variedad de microorganismos fitopatógenos (tanto hongos como bacterias), en determinadas condiciones de cultivo, producen compuestos con propiedades bioestimulantes. Algunos de estos compuestos son volátiles y, a dosis muy bajas, fomentan el crecimiento vegetal, la floración, la formación de frutos, el engrosamiento de paredes celulares y la acumulación de azúcares y aminoácidos en las hojas. En concreto, al analizar los transcriptomas (el conjunto de los ARN transcritos) y los proteomas (el conjunto de las proteínas sintetizadas) de plantas de la especie modelo *Arabidopsis thaliana* sometidas a la acción de compuestos volátiles del fitopatógeno oportunista *Alternaria alternata*, hemos observado cambios drásticos en funciones relacionadas con la fotosíntesis, la asimilación de nutrientes, la protección contra diferentes tipos de estrés y el metabolismo de la planta.

A pesar de las grandes diferencias en la composición de los volatilomas (el conjunto de los compuestos volátiles) de los distintos microorganismos investigados hasta el momento, nuestros estudios han revelado que la planta responde a ellos mediante mecanismos moleculares altamente conservados. Es más, hemos comprobado que tales compuestos activan rutas metabólicas casi desconocidas e inexploradas hasta ahora. El efecto positivo que ejercen no se limita a *A. thaliana*, sino que se extiende también a especies de elevado interés agronómico, como el maíz, el arroz, el pimiento y el tomate. En presencia de los compuestos volátiles en cuestión, estos cultivos crecieron y florecieron más deprisa que los no tratados, y produjeron una mayor cantidad de frutos y semillas.



PATÓGENOS «BUENOS»: Las plantas de la especie *Arabidopsis thaliana* que crecen junto a cultivos de hongos fitopatógenos, como *Fusarium oxysporum* (*a*), *Aspergillus brasiliensis* (*b*) y *Wickerhamomyces anomalus* (*c*), se desarrollan más que las que crecen sin el cultivo adyacente de hongos (*d*).

CORTESÍA DE LOS AUTORES

Un caso de serendipia

Como sucede en numerosos descubrimientos científicos, el nuestro fue un caso de serendipia, puesto que, al estudiar un aspecto diferente de la fisiología vegetal, hallamos algo inesperado y afortunado. Durante varios años nuestro laboratorio ha estado investigando los mecanismos bioquímicos y moleculares que regulan el metabolismo vegetal. En 2008, el entonces doctorando Ignacio Ezquer Garín, hoy en el Departamento de Biociencias de la Universidad de Milán, tuvo la poco

convencional ocurrencia de caracterizar unas plantas cultivadas en medios contaminados por hongos patógenos, aun a pesar de que las pautas generales de funcionamiento de un laboratorio de biotecnología vegetal dictaban que tales cultivos deberían haber sido eliminados. Por fortuna, los hongos contaminantes habían crecido en zonas apartadas de las plantas. Observamos que, lejos de sucumbir, estas acumulaban cantidades excepcionalmente elevadas de almidón y crecían y florecían con rapidez. Interesados por este fenómeno, decidimos realizar nuevas experiencias de manera controlada haciendo uso de una amplia gama de microorganismos y plantas. La trascendencia de los resultados obtenidos ha hecho que el estudio de la respuesta de las plantas a sustancias liberadas por los microorganismos se haya convertido en una de las líneas de investigación principales de nuestro laboratorio.

¿Adaptación biológica?

Nuestro hallazgo, además de aportar información relevante para el diseño de nuevas estrategias biotecnológicas que permitan incrementar la productividad de los cultivos, saca a relucir cuestiones relacionadas con el significado ecológico y el origen evolutivo de las relaciones entre las plantas y los microorganismos mediadas por compuestos volátiles.

Podría argumentarse que la comunicación entre patógenos y plantas constituye un caso particular de interacción entre un depredador y su presa. De este modo, los patógenos engañan a las plantas, a las que «preparan» para que más tarde les sirvan de huésped o alimento.

Pero también podría interpretarse como un sistema de defensa de las plantas, que, al ser sésiles, no pueden desplazarse ante la presencia de un depredador. Se sabe que los vegetales utilizan los compuestos volátiles como mecanismo de advertencia o atracción en las relaciones de comunicación entre plantas o entre plantas e insectos [*véase* «El olfato de las plantas», por Daniel Chamovitz; Investigación y Ciencia, septiembre de 2012]. Es posible pues, que, a lo largo de la evolución, las plantas hayan seleccionado mecanismos de defensa y supervivencia que se activarían tras la percepción de señales de peligro procedentes de depredadores microscópicos localizados en lugares alejados. Estos mecanismos se traducirían en un fortalecimiento de las barreras de protección (como el engrosamiento de las paredes celulares), un mayor crecimiento vegetal y el desarrollo acelerado de flores y semillas.

Retos futuros

El estudio de la respuesta de las plantas a los compuestos emitidos por patógenos microbianos no ha hecho más que empezar. Hasta el momento hemos logrado «domesticar» a estos microorganismos en el laboratorio para que trabajen en nuestro beneficio.

Nos queda estudiar más a fondo la respuesta de la planta a estas sustancias. Si bien hemos aportado pruebas sobre la existencia de mecanismos transcripcionales de regulación de esta respuesta (lo que significa que los compuestos volátiles ejercen su efecto al modificar la transcripción y, por consiguiente, la síntesis de proteínas), recientemente hemos observado que a veces esta se produce con demasiada rapidez como para ser controlada a nivel transcripcional. Uno de los retos que afrontamos consiste en caracterizar los mecanismos de percepción, señalización y respuesta rápida de las plantas a los compuestos volátiles, por ejemplo, mediante los cambios en el estado de oxidación-reducción de las proteínas implicadas. Los estudios basados en la electrofisiología y en técnicas avanzadas de proteómica redox (que estudia las proteínas en su estado de oxidación-reducción) serán fundamentales para investigar este aspecto.

Otro de los retos importantes consiste en identificar nuevos compuestos volátiles microbianos con propiedades bioestimulantes, determinar su estructura química, conocer las concentraciones en las que operan e investigar si lo hacen de manera individual o sinérgica. Hasta el momento se han descrito muy pocos y corresponden a microorganismos catalogados como «beneficiosos». En concreto, en la bibliografía se han identificado 1000 compuestos producidos por 400 especies bacterianas y fúngicas. El listado de estas sustancias, su origen y otras características se recogen en la base de datos mVOC (bioinformatics.charite.de/mvoc), de libre acceso. Teniendo en cuenta que tan solo se han descrito unas 10.000 especies microbianas del millón que se estima que pueden existir en la Tierra, resulta evidente que los microorganismos, tanto «buenos» como «malos», constituyen una enorme cantera aún inexplorada e inexplotada de compuestos volátiles con estructuras y propiedades de elevado potencial biotecnológico. Nuestro descubrimiento fortuito ha multiplicado notablemente las posibilidades de identificar nuevas sustancias bioestimulantes, ya que, a partir de ahora, los estudios de bioprospección pueden abarcar un número de especies y cepas microbianas muy superior al imaginado por Kloeper, Paré y sus colaboradores.

Cuando hayamos superado los retos arriba mencionados, deberán extrapolarse los resultados a las condiciones de campo, en cultivos experimentales. En ellos, el crecimiento, el desarrollo y el metabolismo de las plantas, y la relación de estas con su entorno, están sujetos a variaciones que ocurren en una compleja red de procesos altamente regulados. Se necesitará, por tanto, la cooperación interdisciplinar y transversal de científicos e ingenieros agrónomos, así como el empleo de infraestructuras y técnicas de obtención masiva e interpretación de datos. En la actualidad, nuestra colaboración con la empresa privada y con varios laboratorios europeos y japoneses nos está permitiendo desarrollar varios proyectos cuya finalidad última es avanzar y transferir a la sociedad nuestro conocimiento sobre el modo de acción de sustancias (tanto volátiles como no volátiles) emitidas por microorganismos patógenos.

—Javier Pozueta Romero
—Edurne Baroja Fernández
—Francisco José Muñoz Pérez
Instituto de Agrobiotecnología de Navarra (*Universidad Pública de Navarra-CSIC, Gobierno de Navarra*)

PARA SABER MÁS

Bacterial volatiles promote growth in *Arabidopsis*. Choong-Min Ryu et al. en *Proceedings of the Natural Academy of Sciences*, vol. 100, n.º 8, págs. 4927-4932, 2003.
Volatile compounds emitted by diverse phytopathogenic microorganisms promote plant growth and flowering through cytokinin action. Ángela María Sánchez López et al. en *Plant Cell and Environment*, vol. 39, págs. 2592-2608, 2016.
***Arabidopsis* responds to *Alternaria alternata* volatiles by triggering plastid phosphoglucose isomerase-independent mechanisms.** Ángela María Sánchez López et al. en *Plant Physiology*, vol. 172, págs. 1989-2001, 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

Mecanismos químicos de defensa en las plantas. Jorge M. Vivanco et al. en *IyC*, febrero de 2005.

FORMACIÓN PLANETARIA

Los constituyentes primigenios de la Tierra

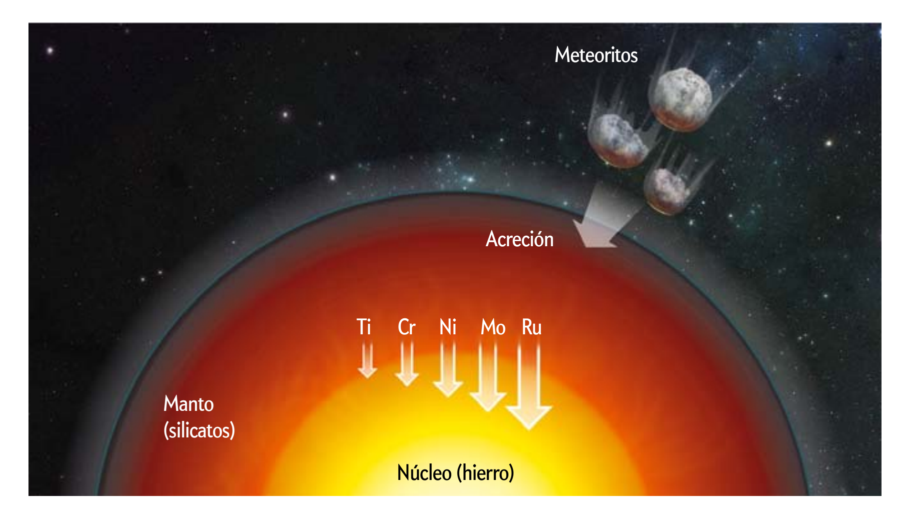
La Tierra creció por acreción de material meteorítico. Nuevos datos isotópicos revelan los cambios experimentados por ese material a lo largo del tiempo y obligan a replantear los modelos de formación de nuestro planeta

RICHARD W. CARLSON

Desde hace más de medio siglo, los expertos han estudiado la composición química de la Tierra comparándola con la de sus potenciales constituyentes cósmicos, representados en muestras de meteoritos. En un trabajo reciente que ha supuesto un salto conceptual, Nicolas Dauphas, de la Universidad de Chicago, ha usado el contenido isotópico de las diferentes clases de meteoritos para identificar aquellos que mejor se corresponden con los bloques básicos que formaron nuestro planeta. Su estudio, publicado en *Nature*, analiza además si el material agregado a la Tierra durante su gestación cambió o no con el tiempo. En el mismo número de la revista, Mario Fischer-Gödde y Thorsten Kleine, de la Universidad de Münster, demuestran que ni siquiera el 0,5 por ciento más reciente de ese material consta del tipo de meteorito que, hasta ahora, se consideraba uno de los principales contribuyentes a la composición de nuestro planeta. El hallazgo desafía las teorías al uso sobre la manera en que la Tierra adquirió su inventario de agua y sustancias volátiles.

En los años setenta del siglo pasado, se demostró que las abundancias de isótopos de oxígeno en la Tierra diferían de las de la mayoría de los meteoritos. Los únicos con una relación similar eran las llamadas condritas de enstatita, ricas en silicio y fuertemente reducidas (la mayor parte del hierro se halla en forma de metal o de sulfuro, no en óxidos). Esa similitud inspiró una serie de modelos que describían la composición terrestre tomando como referencia las condritas de enstatita. Sin embargo, las diferencias entre la composición elemental de tales meteoritos y las rocas terrestres motivaron que la mayoría de los investigadores continuaran usando modelos basados en otra clase de condritas, más oxidadas y ricas en sustancias volátiles: las condritas carbonáceas.

Gracias a los avances para determinar con precisión las abundancias isotópicas, se descubrió que era posible usar una gran variedad de elementos para distinguir entre la Tierra y los meteoritos. En 2011, un estudio sobre diferencias isotópicas sugirió que la Tierra se habría formado a partir de una mezcla de distintas clases de meteoritos, no solo de condritas carbonáceas. Dauphas ha explotado este enfoque y ha desarrollado una metodología que usa la disparidad isotópica entre los diferentes grupos de meteoritos y la Tierra para estimar la composición de los materiales que se agregaron a nuestro planeta durante su etapa de formación.



DIFERENCIACIÓN DEL NÚCLEO: Cuando el núcleo de hierro se separó del manto de silicatos, los elementos más solubles en el metal (titanio, cromo, níquel, molibdeno y rutenio, en orden de afinidad creciente por el núcleo) se incorporaron al núcleo. Después, esos elementos volvieron a añadirse al manto por acreción de más meteoritos. Dos estudios recientes sugieren que el último material agregado a la Tierra se componía de meteoritos pobres en oxígeno. Entre otras preguntas, el hallazgo plantea varias dudas sobre la manera en que el agua llegó a nuestro planeta.

Una nueva historia

El evento de diferenciación química más importante en la historia de la Tierra ocurrió cuando el núcleo de hierro se separó del manto de silicatos. Durante el proceso de formación del núcleo, aquellos elementos que se disolvían mejor en el metal que en los silicatos abandonaron el manto. Algunos, como el iridio, el platino, el paladio o el rutenio, son de hecho tan solubles en metal que el manto debió de quedar muy desprovisto de ellos. Sin embargo, se hallan presentes en el manto en la misma proporción relativa que en los meteoritos primitivos. Además, su abundancia resulta 350 veces menor que en los meteoritos; sin embargo, si el manto y el núcleo se hubiesen encontrado en equilibrio químico, su abundancia debería ser un millón de veces menor.

Una posible explicación es que, una vez completada la formación del núcleo, dichos elementos se añadieran de nuevo al manto como consecuencia de una acreción posterior de material meteorítico, con una masa equivalente a un 0,5 por ciento de la terrestre. Dauphas observa que, en tal caso, la relación isotópica del rutenio del manto debería dar cuenta del último 0,5 por ciento del material que formó nuestro planeta. En cambio, la de aquellos elementos del manto completamente insolubles en metal reflejaría la composición media de todo el material que creó la Tierra.

Al aplicar esta idea al titanio, el cromo, el níquel y el molibdeno (en orden de afinidad creciente por el núcleo), Dauphas estima que la composición isotópica en el manto de cada uno de ellos refleja, respectivamente, el último 95, 85, 39 y 12 por ciento del material incorporado a la Tierra. Después, al tener en cuenta las

diferencias isotópicas de esos elementos en la Tierra y los meteoritos, el autor concluye que nuestro planeta se gestó a partir de una mezcla de meteoritos hasta completar el 60 por ciento de su crecimiento, y casi exclusivamente a partir de condritas de enstatita durante el resto de su formación. Las medidas isotópicas de alta precisión del rutenio presentadas por Fischer-Gödde y Kleine refuerzan la conclusión de que el último 0,5 por ciento del material añadido a la Tierra fue isotópicamente similar a las condritas de enstatita.

El problema del agua

Lo enigmático de tal conclusión es que la composición química de las condritas de enstatita difiere en gran medida de la de las rocas que forman la superficie terrestre. Por tanto, si nuestro planeta se compone en su mayor parte de condritas de enstatita, el interior debería mostrar una composición sustancialmente distinta de la de sus capas externas. Aunque plausible, esta hipótesis no resulta fácil de reconciliar con numerosos indicios. Como alternativa, Dauphas propone que las condritas de enstatita podrían ser residuos de los mecanismos que engendraron la Tierra, pero cuya composición se vio modificada por los procesos de formación planetaria. Se trata de una propuesta intrigante, pero también de una cuyas consecuencias requerirán mucho más estudio.

En caso de que el último 0,5 por ciento del material incorporado a la Tierra hubiera consistido en condritas de tipo CI, una clase particular de condrita carbonácea rica en sustancias volátiles, el planeta habría recibido una cantidad de agua con una masa equivalente a la de los océanos terrestres. Sin embargo, los datos de Fischer-Gödde y Kleine demuestran que ese material tardío estaba compuesto por condritas de enstatita, relativamente «secas». Así pues, la Tierra habría recibido su aporte de agua durante la fase de crecimiento, y no en las etapas tardías de su historia debido a la acumulación de materiales ricos en sustancias volátiles, como las condritas carbonáceas o los cometas.

Los resultados presentados en estos dos trabajos conducen a la inquietante conclusión de que los meteoritos que conocemos no constituyen ejemplos especialmente representativos de los materiales a partir de los cuales se creó la Tierra. Si bien ello hace más difícil inferir la composición global de nuestro planeta, los últimos datos isotópicos y los nuevos métodos para interpretarlos suponen el siguiente paso para entender mejor su proceso de formación.

—Richard W. Carlson
Departamento de magnetismo terrestre
Institución Carnegie para la Ciencia
Washington

Artículo original publicado en *Nature* vol. 541, págs. 468-470, 2017.
Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2017

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

The isotopic nature of the Earth's accreting material through time. Nicolas Dauphas en *Nature*, vol. 541, págs. 521-524, enero de 2017.
Ruthenium isotopic evidence for an inner Solar System origin of the late veneer. Mario Fischer-Gödde y Thorsten Kleine en *Nature*, vol. 541, págs. 525-527, enero de 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

Meteoritos primitivos. Alan E. Rubin en *IyC*, abril de 2013.
El origen del agua en la Tierra. David Jewitt y Edward D. Young en *IyC*, mayo de 2015.

EVOLUCIÓN HUMANA

LOS ALBORES DE LA TECNO



LAS EXCAVACIONES ARQUEOLÓGICAS efectuadas en el yacimiento de Lomekwi 3, en el noroeste de Kenia, han dejado al descubierto los utensilios líticos más antiguos hallados hasta la fecha.



OLOGÍA

NUEVOS RESTOS HALLADOS EN KENIA REFUTAN LA TEORÍA CLÁSICA SOBRE EL ORIGEN DE LA INDUSTRIA LÍTICA Y SU IMPACTO EN LA EVOLUCIÓN HUMANA

Kate Wong

Las tierras baldías del desierto que bordea la orilla noroccidental del lago Turkana, en Kenia, tienen poco que ofrecer a sus moradores. El agua potable escasea y la fauna casi ha desaparecido. Los turkana sobreviven a duras penas en estos terrenos áridos pastoreando cabras, ovejas, vacas, burros y algún camello. Es una vida dura. Pero hace millones de años en este lugar abundaba el agua, la vegetación y la fauna. Debió ser un paraíso para los antepasados de la humanidad que se asentaron aquí.

Kate Wong es editora sénior de *Scientific American*. Se encarga, sobre todo, de los contenidos sobre evolución humana.



Sonia Harmand vino a esta región para estudiar el legado que nuestros ancestros remotos dejaron grabado en las piedras. Arqueóloga en la Universidad de Stony Brook, es una mujer de mirada penetrante y porte imponente. En una mañana brumosa de julio, examina un pedazo de piedra sentada ante una pequeña mesa plegable de madera. De color gris pardusco y el tamaño de una uña, un ojo inexperto diría que no es más que otra vulgar piedra. Pero es justo lo que andaba buscando. Una quincena de trabajadores de Kenia, Francia, Estados Unidos e Inglaterra están excavando en la ladera de un montículo. Con martillo y cincel rompen el duro sedimento ocre en busca de pedazos de roca que puedan revelar vestigios de actividad humana. En la cima, las botellas de agua cuelgan como adornos navideños en las ramas espinosas de una acacia. Así, la brisa matutina las mantendrá algo frescas antes de que arrecie el calor diurno. Por la tarde la temperatura del aire rondará los 40 °C y la superficie de la excavación, sin viento y abrasada por el sol, hará honor a su apodo: el horno.

En 2015 Harmand y su marido, Jason Lewis, paleoantropólogo de la Universidad de Stony Brook, anunciaron que su equipo había descubierto herramientas líticas de hace 3,3 millones de años en el yacimiento Lomekwi 3. Eran las más antiguas descubiertas hasta la fecha y cambiaron el panorama de la evolución humana. Los estudiosos quieren saber quién las hizo y por qué. Pero también tienen otra tarea más inmediata: desenterrar nuevos indicios de que, en efecto, son tan antiguas como parece.

El fragmento que Harmand sostiene en su mano constituye la primera prueba que su equipo ha recuperado de la manufactura de útiles líticos. Se desprendió al golpear una piedra contra otra con el propósito de extraer una pequeña lasca. Su escaso tamaño indica que el yacimiento no ha sido alterado por corrientes de agua durante el largo lapso de tiempo transcurrido. A su vez, avala la idea de que las herramientas de Lomekwi 3 proceden de esta antigua capa de sedimentos y no de otra más reciente. Una vez alcanzado el nivel del yacimiento que contiene los útiles, los excavadores deben proceder con sumo cuidado. «Pole, pole», les indica Harmand en suajili: «Poco a poco».



2

Hace tiempo que los paleoantropólogos consideran la fabricación de herramientas de piedra como una de las características definitorias del género *Homo* y la clave de nuestro éxito evolutivo. Otros animales usan herramientas, pero solo el ser humano es capaz de modelar a su conveniencia materiales duros como la roca. Además, solo nosotros refinamos innovaciones anteriores, para mejorar su utilidad y complejidad con el tiempo. «Parece que somos los únicos que nos hemos vuelto totalmente dependientes de la técnica. No es una simple muleta para ayudarnos. La hemos incorporado a nuestro ser», opina Michael Haslam, de la Universidad de Oxford.

La hipótesis clásica sostiene que esa dependencia dio comienzo durante un período de cambio climático global, hace entre dos y tres millones de años, cuando los bosques de África se transformaron en sabanas. Los homininos, miembros de la familia humana, se encontraron en una encrucijada. Sus fuentes de alimento estaban desapareciendo. La disyuntiva estaba clara: adaptarse o morir. Un linaje, el de los australopitecinos robustos, prosperó adquiriendo fuertes mandíbulas y grandes molares aptos para masticar los vegetales ásperos y correosos que brotaban en los nuevos pastizales. Otro linaje, el de *Homo*, desarrolló un cerebro más voluminoso y comenzó a idear útiles líticos con los que pudo acceder a una amplia variedad de alimentos, entre ellos los animales herbívoros que se alimentaban de la nueva vegetación. Gracias a los nuevos nutrientes aportados por la carne, *Homo* pudo permitirse el lujo de mantener un cerebro aún mayor, que a su vez pudo concebir

FOTOGRAFÍAS DE ANDREW RENNEISEN

EN SÍNTESIS

La explicación tradicional de la evolución humana sostiene que la industria lítica es una creación propia de nuestro género, *Homo*, como adaptación a las variaciones del clima.

Según dicha hipótesis, esa adaptación propició la inmediata aparición en nuestro linaje de un bucle retroalimentado entre el tamaño del cerebro y los avances técnicos.

Con una antigüedad de 3,3 millones de años, los útiles líticos descubiertos recientemente en Kenia son muy anteriores al primer fósil de *Homo*, por lo que refutan ese argumento.

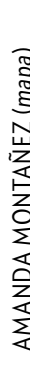
EL EQUIPO DE ARQUEÓLOGOS excava la ladera de una colina en Lomekwi 3 en julio de 2016, en busca de artefactos (*1*). Tamizan cada cubo de sedimento con la esperanza de recuperar hasta los fragmentos más pequeños (*2*). Y se examina cada una de las piedras en busca de indicios de modificación humana.



nuevas y mejores herramientas con las que obtener más calorías. Gracias a ese proceso de retroalimentación, el tamaño de nuestro cerebro no cesó de aumentar y alcanzamos altas cotas de ingenio. Hace un millón de años, los australopitecinos robustos desaparecieron y *Homo* inició el camino que lo conduciría a la hegemonía en el planeta.

Las herramientas de Lomekwi han echado por tierra ese argumento. No solo son demasiado antiguas como para haber sido una creación de *Homo,* sino que también preceden a los cambios climáticos que supuestamente agudizaron la inventiva de nuestros antepasados. Además, no haber encontrado en el yacimiento huesos con marcas de corte u otros indicios de despedazamiento suscita dudas de que se destinaran a tajar animales. De hecho, las piezas de Lomekwi están tan separadas en el tiempo de las demás herramientas prehistóricas que es imposible vincularlas con el resto de la evolución técnica de los homininos. Este hecho sugiere que su invención pudo no ser tan decisiva como los expertos presumían.

Estos nuevos descubrimientos han impulsado a los científicos a tratar de entender cuándo y cómo nuestros predecesores adquirieron las aptitudes intelectuales y físicas necesarias para concebir y tallar herramientas líticas y transmitir ese saber a las generaciones venideras. Si hubo varios linajes de homininos que las fabricaron, forzoso será replantearse los orígenes de la técnica y de qué forma esta modeló nuestra rama genealógica.



Poco a poco, la aurora comienza a perfilar la rala vegetación y la luz baña el cielo, mientras el canto de los pájaros cobra fuerza y la vida se reanuda en el campamento, levantado a casi dos kilómetros de Lomekwi 3 junto a un cauce seco. A las 6:30 los trabajadores salen de sus tiendas y, caminando por un tramo delimitado con piedras, se dirigen a una mesa improvisada para tomar el desayuno; las hileras de pedruscos pretenden disuadir a las serpientes y los escorpiones. Al cabo de una hora, hacinados en todoterrenos, enfilan el camino pedregoso que conduce a la excavación. Falta un vehículo y quedan pocos asientos en el par disponible. Por eso la arqueóloga Hélène Roche decide permanecer hoy en el campamento. Roche es directora emérita de investigación en el Centro Nacional de Investigaciones Científicas de Francia y es experta en industrias líticas primitivas. Luce el pelo corto, de color claro, y viste con los tonos del desierto. Habla en voz baja pero con claridad. Durante 17 años encabezó la investigación en el Turkana occidental, hasta que en 2011 cedió las riendas a Harmand y Lewis. A lo largo de la segunda parte de la expedición ha venido a ver cómo va todo. Esa jornada también decido quedarme en el campamento para averiguar más detalles sobre la historia de los estudios en la región.

Roche recuerda: «En mis comienzos como arqueóloga estábamos acostumbrados a ver herramientas de piedra de 1,8 millones de años de antigüedad en Olduvai». En 1964, el paleoantropólogo keniano Louis Leakey anunció que en la garganta de ese nombre, en Tanzania, su equipo había descubierto fósiles del género *Homo* asociados a lo que por entonces eran los artefactos líticos más antiguos, conocidos como herramientas

olduvayenses. Asignaron los fósiles a una nueva especie, *Homo habilis* («hombre habilidoso»), y arraigó la idea de que su fabricación estaba vinculada a la aparición de *Homo*.

Pero poco después empezaron a surgir indicios de que esas herramientas podrían haber precedido al género *Homo*. En los años setenta, Roche, a la sazón estudiante de doctorado, descubrió herramientas olduvayenses en un yacimiento de Etiopía llamado Gona. Cuando el equipo dirigido por el arqueólogo Sileshi Semaw, ahora en el Centro Nacional de Investigación sobre la Evolución Humana, en Burgos, las analizó llegó a la conclusión de que tenían 2,6 millones de años de antigüedad. Pero como no se halló ningún resto de hominino junto a ellas, no se pudo confirmar con certeza la identidad de su artífice. Semaw y sus colaboradores propusieron como autora a una especie de australopitecino presente en un yacimiento cercano, *Australopithecus garhi*, dotada de un cerebro pequeño. La propuesta no prosperó, ya que para muchos *Homo* seguía siendo el mejor candidato, si bien entonces el fósil más antiguo conocido de tal género tenía solo 2,4 millones de años. Recientemente, un nuevo hallazgo ha sumado otros 400.000 años al registro fósil de nuestro género.


1

Pero a pesar de la gran antigüedad de los artefactos de Gona, la pericia que evidencia su talla era tal que no parecían representar los primeros intentos de fabricación por parte de nuestros ancestros. Paralelamente se descubrieron otros yacimientos líticos muy antiguos, algunos en el Turkana occidental. En los años noventa, Roche encontró herramientas olduvayenses de 2,3 millones de años a 8 kilómetros de aquí, en el yacimiento Lokalalei 2c. Descubrió que en muchas ocasiones se conservaban las secuencias de talla completas y que podía recomponerlas como un rompecabezas de tres dimensiones. Al volver a montar las lascas de piedra sobre los núcleos de los que habían sido arrancadas, Roche y sus colegas demostraron que en Lokalalei los fabricantes podían extraer hasta 70 lascas de un solo bloque pétreo. Este logro impresionante requiere saber cuál es la forma más adecuada para la talla (plana por un lado y convexa por el opuesto), así como una planificación cuidadosa para mantener esa forma mientras se hace girar la piedra. Roche me confiesa: «No puedes imaginar lo que significa sujetar las piezas unidas y reconstruir lo que [el fabricante] hizo y cómo lo hizo; es como penetrar en su mente prehistórica».

Cada vez resultaba más evidente que el grado de refinamiento observado en los útiles de Gona, Lokalalei y otros yacimientos no podía haber surgido de improviso en la mente de sus hacedores. Algún tipo de técnica debió preceder al Olduvayense.

En el año 2010 salieron a la luz indicios de una industria lítica más antigua. Zeresenay Alemseged, hoy en la Universidad de Chicago, y su equipo publicaron el hallazgo de dos huesos de animales procedentes del yacimiento etíope de Dikika que mostraban lo que parecían ser incisiones producidas por herramientas de piedra. Los restos óseos databan de hace 3,4 millones de años, cientos de miles de años más antiguos que los primeros vestigios de *Homo*. Sus descubridores atribuyeron las marcas a *Australopithecus afarensis*, una especie que en muchos aspectos seguía siendo muy primitiva, simiesca. Provista de un cerebro similar al de un chimpancé, su anatomía conservaba adaptaciones a la vida arborícola. Una morfología muy distinta de la que esperaban hallar en los primeros consumidores de carne despiezada: unos homininos más sesudos y completamente bípedos. Pero algunos expertos no ocultaron su escepticismo y adujeron que las marcas podrían haber sido originadas por el pisoteo de otros animales. Sin rastro alguno de las supuestas herramientas responsables, los críticos argumentaron que las marcas de Dikika no podían ser consideradas como pruebas del uso de útiles y, por tanto, la incógnita sobre el momento en que surgieron las primeras industrias quedó sin respuesta.

En el mismo momento en que estalló el debate en torno a los huesos de Dikika, Harmand y Lewis empezaron a urdir un plan para dar con las herramientas que pudieran explicar tales marcas, convencidos de que la factura de los hallazgos de Gona y Lokalalei era demasiado refinada como para ser la primigenia. En verano de 2011 iniciaron la búsqueda de nuevos yacimientos en la orilla occidental del lago Turkana.

La cuenca lacustre, como la mayor parte del Gran Valle del Rift donde se asienta, es el sueño de cualquier paleoantropólogo. No solo alberga gran abundancia de fósiles y artefactos, sino que conserva rocas que, gracias a diversos métodos detectivescos, pueden fecharse con un alto grado de precisión. La sucesión de erupciones volcánicas y de fluctuaciones del nivel del agua ha quedado registrada en las capas de sedimentos que a lo largo de millones de años se han ido acumulando hasta formar una suerte de tarta con múltiples capas. La erosión causada por el agua y el viento ha dejado al descubierto cortes transversales de la tarta en varios puntos a lo largo de la cuenca. La actividad tectónica ha empujado algunas secciones hacia arriba y ha hundido otras. Si en alguna de ellas se puede acceder a varias capas, es posible saber qué parte de la secuencia geológica estamos contemplando y, por tanto, conocer su antigüedad.

Para transitar por esos confines, sin carreteras ni caminos, el equipo recorre los lechos secos de los ríos, llamados *lagas*, que serpentean por la región hacia poniente desde el lago. El 9 de julio de 2011 se dirigían a un yacimiento donde 12 años antes otro equipo había desenterrado el cráneo perteneciente a una nueva especie de hominino, *Kenyanthropus platyops*, de 3,5 millones de años. Pero al tomar un ramal equivocado en



LOS EXCAVADORES removieron y extrajeron los sedimentos durante semanas antes de descubrir el primer artefacto (*1*). Los primeros consistieron en lascas desprendidas durante la talla (*2*). Una capa de ceniza volcánica llamada Toroto Tuff ayudó a datar el yacimiento (*3*).



la *laga* del Lomekwi se perdieron. Encaramados a una colina para divisar mejor los alrededores se percataron de que aquel no parecía un mal lugar para buscar vestigios primitivos. Los afloramientos de sedimentos blandos de origen lacustre suelen conservar bien los fósiles y los artefactos. Y sabían por los mapas geológicos de la zona que los sedimentos esparcidos a lo largo de esa *laga* se remontaban a más de 2,7 millones de años atrás. Así que decidieron examinar los alrededores.

Un par de horas más tarde, Sammy Lokorodi, uno de los turkana del equipo, encontró varias piedras con indicios de talla en las que podían apreciarse las concavidades con forma de cuchara que quedan en la superficie al arrancar lascas. ¿Serían los útiles antiguos y rudimentarios que andaban buscando? Tal vez, pero los habían encontrado a ras de suelo. Un humano actual, quizás un nómada turkana, podría haberlos hecho y dejado allí. Sabían que para recabar pruebas convincentes de su antigüedad tendrían que descubrir más piezas enterradas a cierta profundidad en el sedimento, sin signos de alteración desde su deposición. Solo de esa forma podrían realizar análisis geológicos del yacimiento y calcular la antigüedad de los artefactos con la debida precisión. El trabajo acababa de comenzar.

En el año 2015, cuando hicieron público su descubrimiento en la revista *Nature*, habían desenterrado 19 herramientas de piedra en un área de 13 metros cuadrados. Y habían correlacionado geológicamente el estrato de sedimentos que las albergaba con otras capas de roca que podían ser fechadas: una capa de ceniza volcánica de hace 3,31 millones de años llamada Toroto Tuff y una segunda con polaridad magnética inversa de 3,33 millones de años, una época en que los polos magnéticos terrestres habían intercambiado su posición. También localizaron la fuente de la materia prima con la que fueron fabricadas: una antigua orilla del lago de hace 3,33 millones que contiene cantos de basalto volcánico y fonolita, además de fósiles de peces y cocodrilos que demuestran que los niveles del lago eran mucho más altos que hoy en día. Todos esos datos señalaban que las herramientas tenían una antigüedad de 3,3 millones de años, 700.000 más que las de Gona y 500.000 más que el fósil más antiguo de *Homo*.

Pero los artefactos guardan escasas semejanzas con la industria olduvayense. Son mucho más grandes; algunas lascas alcanzan el tamaño de una mano. Ciertos experimentos indican que fueron tallados con técnicas distintas. Harmand explica que los talladores olduvayenses recurrían sobre todo a la técnica de la mano alzada, en la que el bloque original se sujeta con una mano mientras con la otra se le golpea con una piedra. En cambio, los talladores de Lomekwi golpeaban el núcleo sujeto con ambas manos contra un yunque situado en el suelo o bien lo colocaban sobre el yunque y lo golpeaban con otra piedra percutora. Las técnicas usadas y los útiles fabricados denotan una comprensión de la mecánica de la fractura, pero al mismo tiempo menos destreza y planificación que en el caso de Gona y Lokalalei. Así pues, habían descubierto una industria lítica anterior a la olduvayense, que han denominado lomekwianense.

PERO NO TODOS ESTÁN CONVENCIDOS DE QUE LAS HERRAMIENtas de Lomekwi sean tan antiguas como aseguran sus descubridores. Algunos sostienen que no ha quedado probado que los artefactos procedan de los sedimentos datados en 3,3 millones de años. Ciertos objetos desenterrados en esta última campaña de trabajo, los fragmentos de talla y las pocas herramientas recuperadas durante la excavación podrían ayudar a disipar esas dudas. Pero hasta aquellos que dan por buena la antigüedad y atribuyen la autoría del tallado a los homininos deben enfrentarse con el significado de este hallazgo.

En primer lugar, ¿quién las hizo? Hasta hoy no se ha recuperado ningún fósil de hominino en ese yacimiento, salvo un único y enigmático diente. La antigüedad y la ubicación geográfica de las herramientas plantean tres posibilidades: *K. platyops*, la única especie de hominino que se sabe que habitó el Turkana occidental en esa época; *A. afarensis*, la especie asociada a los huesos de animales de Dikika, y *A. deyiremeda*, otro miembro del género recientemente descrito gracias a una mandíbula hallada en Etiopía. Sería una sorpresa que el artífice fuera *K. platyops* o *A. afarensis*, pues ambos poseían un cerebro de volumen similar al del chimpancé y los entendidos siempre han pensado que los primeros fabricantes de útiles tendrían

un cerebro mayor. En el caso de *A. deyiremeda* ignoramos su volumen cerebral.

La escasa capacidad craneana no es el único rasgo anatómico inesperado del primer tallador. Los paleoantropólogos pensábamos que el uso de las herramientas surgió una vez que nuestros antepasados abandonaron la vida arbórea para caminar por el suelo erguidos sobre sus dos miembros posteriores. Según dicha hipótesis, solo después de que las manos de los homininos quedaron libres de las imposiciones de la trepa pudieron adoptar la morfología propicia para elaborar herramientas. Sin embargo, el estudio de *A. afarensis*, la única especie de la que se han hallado huesos más allá de la cabeza, indica que su locomoción era bípeda pero conservaba rasgos que le habrían permitido trepar a los árboles en busca de alimento o cobijo. ¿Qué papel desempeñó en la aparición de la industria lítica el cambio de hábitat que supuso el descenso de los árboles al suelo?

Es más, las herramientas de Lomekwi 3 han obligado a reconsiderar por qué los homínidos las idearon. La reconstrucción paleoambiental del yacimiento de Lomekwi hace 3,3 millones de años nos indica que la región estaba arbolada y no era una sabana, el ambiente que los expertos suponían que impulsó el desarrollo de las habilidades para la talla en el género *Homo*.

Quizá la pregunta más importante sea: ¿por qué las herramientas de Lomekwi 3 están tan alejadas en el tiempo de otras industrias líticas? Si su fabricación era tan esencial como se ha venido sosteniendo siempre, ¿por qué tras su invención no se difundió con rapidez entre los homininos y el proceso de retroalimentación que acabó agrandando el cerebro tardó tanto en arrancar?

Algunos estudios recientes ayudan a explicar cómo un hominino más primitivo que *Homo* pudo haber llegado a fabricarlas. Tal vez la capacidad cognitiva de los homininos no fuera tan distinta de la de otros primates coetáneos. Por ejemplo, el estudio de nuestros parientes actuales más cercanos revela que, si bien de natural no fabrican ese tipo de útiles, sí poseen muchas de las habilidades precisas para ello. David Braun, de la Universidad George Washington, y Susana Carvalho, de la Universidad de Oxford, han observado que los chimpancés silvestres de Bossou (Guinea) cascan nueces sirviéndose de piedras y saben reconocer las propiedades físicas de distintos tipos de roca. Los investigadores pusieron a disposición de varios grupos de chimpancés de Kenia y de Bossou un conjunto de piedras con características dispares para llevar a cabo esa labor. A pesar de su inexperiencia con ese tipo de rocas, en general supieron escoger las más adecuadas. También los experimentos con bonobos cautivos realizados por Nicholas Toth, del Instituto de la Edad de Piedra en Bloomington (Indiana), han demostrado que es posible entrenarlos para extraer lascas con bordes afilados que emplean para cortar una cuerda. Según Toth, «no tengo la menor duda de que nuestros simios serían capaces de replicar lo que [Harmand y su equipo] han hallado en Lomekwi, si les proporcionáramos la materia prima idónea».

Parece incluso que la invención de la talla de útiles no requiere un intelecto privilegiado. El otoño pasado, Tomos Proffitt, de la Universidad de Oxford, y sus colaboradores relataron cómo monos capuchinos del Parque Nacional Serra da Capivara (Brasil) lograban arrancar de forma involuntaria lascas afiladas que semejan útiles olduvayenses. En su hogar abundan los cantos de cuarcita, y a menudo toman un bloque y lo golpean contra otro incrustado en el suelo que actúa como yunque. De ese modo extraen lascas afiladas con las mismas características que las herramientas líticas producidas deliberadamente, incluidas las concavidades de los márgenes con forma de cuchara que aparecen por la denominada fractura concoidea. Sin embargo, su objeto de interés no parecen ser las lascas, sino el polvo de cuarzo que se desprende, ya que hacen pausas para lamer el que queda depositado sobre el yunque. Tal vez al principio los homininos obtuvieron lascas por accidente o tal vez encontraron piedras afiladas de forma natural en su entorno. Solo más tarde, una vez descubierta su utilidad, dio inicio su elaboración con un fin concreto.

Después de ver de lo que son capaces nuestros parientes primates, existe la posibilidad de que los fabricantes de Lomekwi tuvieran manos capaces de tallar y al mismo tiempo aptas para trepar a los árboles. La mano humana, provista de dedos cortos y rectos y un pulgar largo y oponible, está diseñada específicamente para ejercer prensiones de fuerza y de precisión, acciones que ejecutamos cada vez que agarramos un martillo, giramos una llave o tecleamos un texto. Sin embargo, las observaciones de chimpancés, bonobos y capuchinos muestran que otros primates cuyas manos están adaptadas para asir las ramas de los árboles también pueden ser sorprendentemente diestros. Por tanto, las manos de los homininos parcialmente arborícolas podrían haber tenido las mismas capacidades.

De hecho, estudios recientes de los huesos de la mano de tres homininos de cerebro pequeño hallados en Sudáfrica (*Australopithecus africanus*, *A. sediba* y *Homo naledi*) indican una combinación de estas actividades. Los tres tienen los dedos curvados, un rasgo asociado con la trepa. Otros rasgos, en cambio, recuerdan a las manos de los fabricantes de herramientas. Tracy Kivell y Matt Skinner, ambos en la inglesa Universidad de Kent, analizaron la estructura interna de los huesos de la mano para conocer las tensiones soportadas en vida por esas extremidades. Hallaron un patrón similar al de otros homininos que se sabe que construían y usaban útiles y cuya estructura ósea interna difiere de la propia de los chimpancés. «Ser un buen trepador y un hábil tallador no es algo incompatible», afirma Kivell. Manos muy distintas son capaces de elaborar y usar herramientas de piedra. Los cambios evolutivos solo las han optimizado para esas tareas.

La noche del viernes es momento de *choma* [barbacoa] y para la ocasión el equipo de Lomekwi prepara cabra asada. Nick Taylor, de Stony Brook, un británico simpático, aprovecha para probar a qué fin pudieron servir las herramientas descubiertas. Aquella mañana uno de los pastores turkana había traído el animal que habían comprado para el banquete. Por la tarde, cuando el sol comienza a caer sobre el horizonte, dan comienzo los preparativos para la cena y Taylor pide al cocinero Alfred «Kole» Koki que la descuarti-

SI TE INTERESA ESTE TEMA...



Descubre *Cultura y evolución humana*, nuestro monográfico de la colección TEMAS que recoge los artículos más relevantes de *Investigación y Ciencia* sobre la estrecha relación entre el desarrollo de la cultura y la evolución humana.

www.investigacionyciencia.es/revistas/temas/numero/87

ce con réplicas de las herramientas halladas en Lomekwi. Koki, con gran experiencia como matarife, duda de su utilidad. A pesar de sus reticencias, toma una lasca de cinco centímetros de largo y empieza a cortar. Con esos útiles líticos afilados se las arregla para despellejar casi toda la chiva y trocear parte de su carne, reemplazándolos conforme se desgastan. Hasta que llega un momento en que reclama su cuchillo de acero para rematar el trabajo.

Taylor observa cómo Koki sujeta y maneja instintivamente cada lasca y cuánto tiempo la usa antes de pedir otra nueva. Guarda las desechadas para comparar el desgaste del filo de estas réplicas con el de las originales. Asimismo, recogerá algunos de los huesos para estudiar qué clase de marcas de corte pueden haber quedado en su superficie. También probará los útiles con materiales vegetales, como madera y tubérculos. Además, anda buscando cualquier resto ínfimo en las piezas de Lomekwi que aporte pistas sobre lo que despedazaban con ellas.

En cualquier caso, el dominio en la fabricación de útiles demostrado por los homininos de Lomekwi no tuvo continuidad. Casi 700.000 años los separan de los siguientes más antiguos, los hallados en Gona. Quizás en ese lapso sí se fabricaran, pero los arqueólogos no han dado con ellos aún. También cabe la posibilidad de que la industria lítica de Lomekwi sea un fenómeno aislado, sin relación con la posterior técnica olduvayense. De hecho, el registro de este último período es desigual y variable: aparecen distintos tipos de útiles en diferentes yacimientos y momentos sin gran continuidad entre sí. Tal y como dice Roche: «No hay una única olduvayense, sino varias».

Esa heterogeneidad ha llevado a muchos arqueólogos a pensar que algunos grupos pertenecientes a distintos linajes de homininos, y posiblemente de otros primates, adquirieron la habilidad para tallar útiles líticos de forma independiente. Pero sus invenciones se perdieron sin pasar a la siguiente generación. Dietrich Stout, de la Universidad Emory, señala que «antes pensábamos que tras la invención de la talla se inició una carrera sin pausa». Pero piensa que tal vez para estas poblaciones tan antiguas la técnica no era tan importante para su supervivencia, así que simplemente desapareció.

Con todo, algo cambió hace unos dos millones de años. Las herramientas de ese período empezaron a fabricarse con técnicas más homogéneas. Hace alrededor de 1,7 millones de años surge una industria más refinada: la achelense. Su útil más característico es el bifaz, la verdadera navaja suiza del Paleolítico, cuya factura se extendió por África y otras regiones del Viejo Mundo.

Braun cree que el cambio tiene que ver con la mejora de la capacidad para transmitir la información. Los chimpancés parecen tener lo que él denomina una baja fidelidad en la transmisión de los comportamientos adquiridos a través de la observación. Esa modalidad de aprendizaje funciona bastante bien con tareas sencillas. Al término de las seis semanas de experimentación a las que su equipo sometió a los chimpancés de Bossou, todo el grupo estaba usando las rocas de la misma manera. El comportamiento se transmitió del modo siguiente: un individuo, por regla general joven, miraba a otro, generalmente adulto, mientras este blandía un tipo concreto de roca para cascar nueces. Después, el joven observador intentaba usar ese mismo tipo de piedras con idéntico fin.

Pero los humanos enseñamos a nuestros congéneres a hacer cosas más complejas, desde hornear una tarta hasta pilotar un avión, por medio de una transmisión de alta fidelidad. Tal vez, sugiere Braun, la variabilidad observada en los útiles de Lomekwi y en el Olduvayense más antiguo sea el resultado de una transmisión de baja fidelidad. La normalización propia del Olduvayense más evolucionado y del Achelense indica la aparición de un medio más eficaz para compartir el conocimiento, algo que permitió a la humanidad avanzar en su complejidad técnica.

Aunque las herramientas de Lomekwi 3 son muy viejas, el equipo sospecha que puede haber yacimientos más antiguos por descubrir. Uno de los días, mientras los demás estaban excavando, Lewis, Lokorodi y Xavier Boës, geólogo del Instituto Nacional de Investigación Arqueológica Preventiva, fueron en su busca. Se dirigieron a una zona que contiene sedimentos anteriores a los de Lomekwi 3. Tomaron el mismo derrotero que pretendían tomar cinco años atrás cuando se extraviaron y descubrieron Lomekwi 3, dejando tras de sí una nube de polvo sobre la *laga*.

Llegados al destino se dispersan y, con su mirada avezada, escudriñan el suelo en busca de indicios de actividad humana entre un mar de rocas enrojecidas por la luz solar. Lokorodi no tarda en descubrir bloques que presentan extracciones cóncavas con forma de cuchara. En teoría es posible que tengan más de 3,5 millones de años de antigüedad. Pero tendrán que seguir los mismos procedimientos minuciosos que en Lomekwi 3. Habrán de determinar si las piedras han sido manipuladas y alteradas por manos humanas y, de ser así, averiguar a qué nivel estratigráfico pertenecen, calcular la edad del mismo y encontrar más útiles enterrados en los sedimentos sin signos de erosión. Lewis fotografía las rocas y toma nota de su ubicación con miras a una futura excavación. El equipo también explorará otra zona interesante situada a unos cinco kilómetros de Lomekwi 3, cuyos sedimentos superan los cuatro millones de años.

Si queremos desentrañar la relación entre los cambios en la alimentación, las herramientas y los orígenes de *Homo*, es fundamental averiguar qué industrias precedieron y sucedieron a Lomekwi 3 y obtener una perspectiva más clara de los cambios ambientales. «Quizá la relación sea la misma pero sucediese en una época más remota. El hecho de que el escenario se haya desmoronado no quiere decir que no podamos volver a recomponerlo», matiza Lewis.

«Ahora sabemos bastante, pero no lo suficiente», afirma Roche en alusión a los descubrimientos del Turkana occidental. «Esto es solo el comienzo.» IyC

PARA SABER MÁS

3.3-million-year-old stone tools from Lomekwi 3, West Turkana, Kenya. Sonia Harmand et al. en *Nature*, vol. 521, págs. 310-315, 21 de mayo de 2015.

Wild monkeys flake stone tools. Tomos Proffitt et al. en *Nature*, vol. 539, págs. 85-88, 3 de noviembre de 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

Los orígenes de la creatividad. Heather Pringle en *IyC*, mayo de 2013.

¿Cómo nos cambió la fabricación de herramientas? Dietrich Stout en *IyC*, junio de 2016.

El origen de la cultura humana. Zenobia Jacobs y Richard G. Roberts en *IyC*, noviembre de 2009.

Talla lítica y desarrollo cognitivo. Núria Geribàs Armengol en *IyC*, febrero de 2012.

ASTROFÍSICA

EL EXTRAÑO COMPORTAMIENTO DE LA ESTRELLA DE TABBY

Es probable que la tecnología extraterrestre no esté causando los misteriosos oscurecimientos que experimenta este astro. Pero resulta difícil encontrar explicaciones alternativas

Kimberly Cartier y Jason T. Wright

Ilustraciones de Victor Mosquera

U

UNA TRANQUILA TARDE DE OTOÑO DE 2014, CUANDO los árboles cambiaban de verde a dorado, Tabetha Boyajian vino a la Universidad Estatal de Pensilvania para comentar con nosotros un hallazgo poco usual. Aquel paisaje a punto de transformarse resultó ser un telón de fondo más que apropiado para una reunión que, a la postre, cambiaría el curso de nuestras carreras.

Boyajian, por entonces investigadora posdoctoral en Yale, había descubierto unas inexplicables fluctuaciones en una de las estrellas observadas por el telescopio espacial Kepler, el instrumento cazaplanetas de la NASA. Aquellas amortiguaciones de brillo no se parecían en nada a las que debería causar un exoplaneta que pasase por delante de la estrella. Boyajian ya había descartado varias posibilidades, incluidos problemas en los instrumentos de Kepler, y buscaba nuevas ideas. Entonces uno de nosotros (Wright) sugirió algo muy poco ortodoxo: ¿podrían aquellas fluctuaciones estar causadas por una megaestructura extraterrestre?

En los años sesenta, Freeman Dyson, físico teórico del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, postuló que las civilizaciones alienígenas tecnológicamente muy avanzadas intentarían recubrir su estrella con gigantescos colectores solares (un tipo de estructura hoy conocida como «esfera de Dyson») para aprovechar su luz. ¿Nos hallábamos ante la primera prueba de que la existencia de otras culturas cósmicas era algo más que ciencia ficción? Aquella idea era una hipótesis desesperada. Pero, por el momento, no podíamos descartarla.

La estrella que había dejado perpleja a Boyajian —hoy conocida oficialmente como «estrella de Boyajian» y coloquialmente como «estrella de Tabby»— ha cautivado por igual al público y a los astrónomos. Y, como todos los grandes enigmas, ha generado una enorme cantidad de posibles explicaciones, ninguna de las cuales logra dar cuenta de todos los datos. Sea lo que sea lo que está causando la atenuación de este astro, puede que no pertenezca al dominio de los fenómenos astronómicos conocidos.

EL TESORO DE KEPLER

Antes del lanzamiento de Kepler, en 2009, la mayoría de los cazadores de exoplanetas se veían obligados a descubrir mundos de uno en uno, como pescadores que sacan peces del mar con una caña. Kepler, sin embargo, irrumpió en escena como un barco de arrastre, localizando miles de planetas de una sola tacada.

Durante cuatro años, el telescopio observó de manera ininterrumpida las estrellas de una pequeña región de la Vía Láctea. Buscaba tránsitos planetarios: el momento en el que un mundo lejano, debido a su posición fortuita con respecto a línea de visión desde la Tierra, pasa por delante de la estrella en torno a la cual orbita y bloquea una pequeña parte de su luz. Este fenómeno queda reflejado en la llamada «curva de luz» de la estrella: la gráfica que representa cómo cambia su brillo con el tiempo. Sin planetas que pasen por delante, dicha curva tomará el aspecto de una línea horizontal. Pero, en presencia de un planeta en tránsito, la gráfica presentará una serie de caídas en forma de U, las cuales se repetirán de forma periódica cada vez que el cuerpo se sitúe delante de la estrella. La duración, el ritmo y la profundidad de estas caídas de brillo permiten obtener información sobre el planeta, como su tamaño y su temperatura.

De las más de 150.000 estrellas estudiadas por Kepler, solo una, conocida como KIC 8462852 por su número en el catálogo, ha mostrado una curva de luz sin explicación aparente. Los miembros del proyecto de ciencia ciudadana Planet Hunters («Cazadores de Planetas») fueron los primeros en percatarse del fenómeno al escudriñar los datos de Kepler en busca de mundos que los algoritmos automáticos de los astrónomos profesionales hubieran pasado por alto. KIC 8462852 presentaba caídas de brillo aparentemente aleatorias, con algunas que duraban tan solo unas pocas horas y otras que persistían durante días o semanas. En ocasiones, su brillo disminuía un 1 por ciento (un valor típico para los exoplanetas de mayor tamaño), pero otras caía en picado hasta en un 20 por ciento. Ningún sistema planetario concebible podía producir una curva de luz tan extrema y variable.

Perplejos, los miembros de Planet Hunters lo notificaron a Boyajian, una de las encargadas de supervisar este proyecto de ciencia ciudadana. En 2016, describieron la estrella y sus misterios en un artículo con revisión por pares que llevaba por subtítulo «Where's the flux?» («¿Dónde está el flujo?»), razón por la que Boyajian llama a KIC 8462852 la «estrella WTF».

EXTRAÑA EN MUCHOS SENTIDOS

Pero la estrella de Boyajian encerraba más sorpresas. A raíz de aquel artículo, Bradley Schaefer, de la Universidad Estatal de Luisiana, examinó los datos de archivo del astro y halló que, a lo largo del siglo pasado, su brillo había disminuido en más de un 15 por ciento.

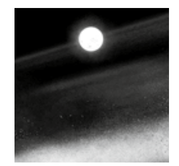
Se trataba de una afirmación controvertida, dado que una atenuación así, ocurrida a lo largo de varias décadas, parece casi imposible. Tras su nacimiento, las estrellas mantienen prácticamente el mismo brillo durante miles de millones de años, y solo sufren cambios rápidos antes de morir. Pero tales cambios «rápidos» tienen lugar en una escala de millones (en lugar de miles de millones) de años, y vienen acompañados por claras señales que la estrella de Boyajian no presenta. Según todas las mediciones, KIC 8462852 es un astro de mediana edad sin nada de particular. No hay indicaciones de que se trate de una estrella variable con cambios regulares de brillo. Y tampoco de que se encuentre acretando material de una estrella compañera, de que presente una actividad magnética anómala ni de que sea un astro joven en proceso de formación (fenómenos todos ellos que podrían causar alteraciones rápidas de brillo). De hecho, si dejamos de lado sus anómalas atenuaciones, la estrella parece completamente normal.

Sin embargo, la conclusión de Schaefer se vio respaldada cuando Benjamin T. Montet, del Instituto de Tecnología de California, y Joshua D. Simon, de la Institución Carnegie, revisaron los datos originales de calibración de Kepler, menos conocidos. Encontraron que el brillo de la estrella se había atenuado en un 3 por ciento durante los cuatro años de la misión: un fenómeno tan extraordinario como las caídas de brillo a corto plazo.

Así pues, ahora nos vemos ante la necesidad de explicar dos insólitos fenómenos relacionados con la estrella de Boyajian: una lenta atenuación a lo largo de al menos cuatro años (y, posiblemente, durante todo el siglo pasado), y profundas e irregulares caídas de brillo que duran días o semanas. Si bien nos gustaría disponer de una explicación única para ambos efectos, cada uno de ellos ya resulta difícil de entender por separado, más aún cuando lo consideramos junto con el otro.

MUCHAS RESPUESTAS, NINGUNA CONVINCENTE

A continuación analizaremos algunos de los escenarios que se han propuesto para explicar el comportamiento de la estrella de Boyajian. Repasaremos hasta qué punto cada uno de ellos puede dar cuenta de las observaciones y evaluaremos subjetivamente la probabilidad de que sea correcto.



UN DISCO DE POLVO Y GAS

Las caídas irregulares de brillo y la atenuación a largo plazo registradas en la estrella de Boyajian se observan también en otros sistemas: estrellas muy jóvenes con planetas aún en formación. Estas se hallan rodeadas por discos de gas y polvo calentados por la luz del astro, que, a medida que se gestan los planetas, desarrollan aglomeraciones

Kimberly Cartier realiza su tesis de doctorado en la Universidad Estatal de Pensilvania. Su investigación se centra en el estudio de exoplanetas y sus estrellas anfitrionas.

Jason T. Wright es profesor de astronomía y astrofísica en el Centro de Exoplanetas y Mundos Habitables de la Universidad Estatal de Pensilvania. Participa también en la búsqueda de inteligencia extraterrestre.

EN SÍNTESIS

Situada a más de 1000 años luz de distancia, KIC 8462852, también conocida como «estrella de Boyajian» o «estrella de Tabby», es uno de los objetos estudiados por el telescopio espacial Kepler, especializado en la búsqueda de exoplanetas.

El astro ha desconcertado a los astrónomos debido a sus drásticas e irregulares caídas de brillo. Al mismo tiempo, los datos de archivo parecen indicar que su flujo ha estado disminuyendo de manera paulatina a lo largo del último siglo.

El fenómeno no se deja explicar de manera satisfactoria por medio de ningún proceso natural conocido. Las hipótesis abarcan desde discos de gas y polvo hasta restos interestelares, enjambres de cometas o incluso agujeros negros.

Más allá de estos escenarios se encuentra la insólita posibilidad de que el extraño comportamiento de la estrella de Boyajian sea causado por una «esfera de Dyson»: una megaestructura alienígena construida a su alrededor para absorber su energía.

de material, anillos y deformaciones. Si el disco se ve de canto, puede atenuar la luz de la estrella y, al mismo tiempo, su cambiante estructura puede bloquear cantidades cada vez mayores de luz durante décadas y siglos.

Sin embargo, nuestra estrella no es joven, sino de mediana edad, y aparenta carecer de disco. Como cualquier objeto caliente, un disco así radiaría calor en forma de luz infrarroja adicional: un exceso que la estrella de Boyajian no muestra. Podría ocurrir que el polvo y el gas se dispusieran en un anillo muy delgado y extenso alrededor del astro, de modo que bloquease su luz a lo largo de nuestra línea de visión sin generar un gran exceso de radiación infrarroja. No obstante, tales discos nunca se han observado alrededor de una estrella de mediana edad. Debido a que este escenario solo puede explicar los datos recurriendo a un fenómeno nunca antes visto, lo juzgamos muy poco probable.



UN ENJAMBRE DE COMETAS

La hipótesis original de Boyajian fue que el oscurecimiento de la estrella podría deberse al tránsito de un enjambre de cometas gigantes. A fin de cuentas, los cometas pasan la mayor parte del tiempo lejos de su estrella y se mueven en órbitas muy excéntricas, lo que podría explicar la irregularidad de la atenuación. Pero ¿y la falta de calor? Los cometas se calentarían al acercarse a la estrella y se enfriarían con rapidez al alejarse. Por tanto, cualquier exceso de radiación infrarroja solo podría detectarse durante las disminuciones de brillo. En estos momentos no observamos radiación infrarroja adicional, pero esa ausencia podría explicarse si los cometas que causaron las caídas de brillo hace unos años estuvieran ahora muy lejos del astro, fríos y sin emitir calor detectable. Aun así, para que un enjambre de cometas pudiera explicar la misteriosa atenuación a largo plazo, tendría que ser de enormes dimensiones, lo que inevitablemente crearía un exceso de radiación infrarroja que, como hemos señalado, no se observa.

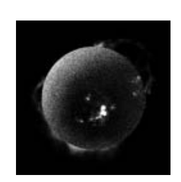
Por tanto, nuestro veredicto es que una explicación basada en cometas resulta plausible para las caídas de brillo y muy improbable para la atenuación a largo plazo. Pero parece lógico pensar que, si los cometas no causan la atenuación a largo plazo, entonces seguramente tampoco provoquen las rápidas disminuciones de brillo.



UNA NUBE EN EL MEDIO INTERESTELAR O EN EL SISTEMA SOLAR

El espacio interestelar se encuentra lleno de gas y polvo, los cuales absorben la luz de las estrellas. Tal vez una nube de este material esté bloqueando una cantidad variable de luz a medida que la línea de visión de Kepler atraviesa diferentes partes de ella durante la órbita del telescopio alrededor del Sol. Dicha nube podría presentar un gradiente de densidad que atenuase el brillo de la estrella de Boyajian en escalas de tiempo largas, así como pequeñas acumulaciones de material que causaran las profundas caídas a corto plazo. El trabajo de Valeri Makarov, del Observatorio Naval de EE.UU., y su colaborador Alexey Goldin respalda en cierta medida esta hipótesis. Estos autores proponen que algunas de las pequeñas disminuciones de brillo atribuidas a la estrella de Boyajian corresponderían en realidad a grandes caídas procedentes de estrellas más tenues y adyacentes en el campo de visión de Kepler, tal vez causadas por enjambres de diminutas y densas nubes o cometas en el espacio interestelar. A nuestro juicio, se trata de una hipótesis plausible.

Una explicación relacionada propone que la nube que causa el oscurecimiento podría estar en los aledaños de nuestro propio sistema solar. En tal caso, la órbita de Kepler alrededor del Sol haría que la línea de visión del satélite atravesara la nube cada año. Sin embargo, las disminuciones de brillo de la estrella de Boyajian no muestran una repetición anual. Además, hoy por hoy no contamos con ninguna razón para pensar que dicha nube exista. Aunque cabe imaginar que los géiseres de un cuerpo similar a Plutón pero mucho más alejado del Sol podrían generar una nube de hielo y vapor, creemos que, hasta que los planetólogos sopesen esta opción, se trata de una hipótesis concebible pero poco probable.



VARIACIONES INTRÍNSECAS DE LA ESTRELLA

Las estrellas experimentan cambios de luminosidad cuando el combustible de su núcleo comienza a agotarse. Sin embargo, esto ocurre en escalas de millones de años, no de siglos o días, y sucede en las etapas finales de su vida, no en las intermedias. Otros fenómenos naturales, como las manchas y erupciones estelares que a menudo se ven en el Sol, modifican la luminosidad de las estrellas en escalas de tiempo menores. Tal vez no tengamos que recurrir a la existencia de material adicional en torno a la estrella de Boyajian si sus caídas irregulares de brillo y su atenuación a largo plazo pueden explicarse mediante procesos físicos inherentes al objeto.

Hace poco, Mohammed Sheikh y sus colaboradores de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign analizaron estadísticamente las profundidades y duraciones de las disminuciones de brillo a corto plazo. Encontraron que estas se distribuían según una ley de potencias característica de una transición de fase continua (como la que ocurre cuando un conjunto de imanes se alinean en presencia de un campo magnético). Según los autores, dicho patrón sugiere que las caídas de brillo de la estrella de Boyajian podrían deberse a que el astro está a punto de sufrir una transición interna, como una inversión global de su campo magnético.

No obstante, ninguna estrella similar a la de Boyajian ha exhibido nunca semejante actividad. De hecho, el astro parece demasiado caliente para desarrollar el tipo de dinamo que genera efectos magnéticos en estrellas más frías, como el Sol. Además, los campos magnéticos estelares no podrían causar el oscurecimiento a largo plazo.

Brian Metzger, de la Universidad de Columbia, y sus colaboradores han propuesto una explicación más plausible. Según esta, un planeta o una enana marrón podrían haber chocado en el pasado contra la estrella de Boyajian. La colisión habría causado que el astro acrecentase su luminosidad de manera temporal, por lo que la atenuación observada a largo plazo correspondería al retorno a su brillo normal. Este escenario no explica de manera natural las caídas irregulares de brillo ni la forma detallada de la atenuación que apreciaron Montet y Simon a partir de los datos de calibración de Kepler, pero tal vez los estudios futuros resuelvan estos problemas.

Por todo ello, nuestro veredicto es que la explicación basada en un choque se muestra relativamente plausible, pero juzgamos muy improbables otras hipótesis que recurran a variaciones intrínsecas del brillo.

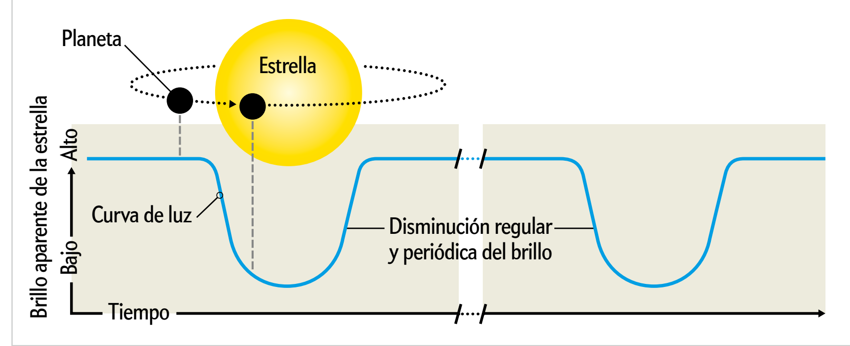
OBSERVACIONES

Una enigmática curva de luz

Son varios los fenómenos que pueden explicar las disminuciones de brillo de una estrella, desde manchas estelares y tránsitos planetarios hasta discos de gas y polvo. Sin embargo, ninguna de estas posibilidades parece poder aplicarse al caso de KIC 8462852, también conocida como «estrella de Boyajian» o «de Tabby», en honor a la astrónoma Tabetha Boyajian.

Curva de luz típica

Las atenuaciones de una estrella pueden estudiarse a partir de su «curva de luz»: la gráfica que representa la evolución de su brillo con el tiempo. Un planeta o disco que pase por delante provocará una depresión en la curva. En el caso de los planetas, estas caídas se repiten con cada período orbital.



AGUJEROS NEGROS

Algunos miembros del público han sugerido que la causa del fenómeno podría guardar relación con un agujero negro. Una idea muy extendida postula que un agujero negro de masa estelar en una órbita cercana alrededor de la estrella podría bloquear su luz. Sin embargo, esta hipótesis no se sostiene por tres motivos. En primer lugar, el tirón gravitatorio del agujero negro causaría que la estrella experimentase un vaivén fácilmente detectable (y que el equipo de Boyajian buscó sin éxito). En segundo lugar, los agujeros negros de masa estelar son mucho más pequeños que las estrellas, por lo que uno de ellos solo podría bloquear una mínima parte de su luz. De hecho, y aunque resulte antiintuitivo, el intenso campo gravitatorio de un agujero negro amplificaría la luz de una estrella situada en segundo plano. En tercer lugar, cuando un agujero negro consume gas y polvo, este material se calienta tanto que brilla con gran intensidad en todas las longitudes de onda. Si realmente hubiera un agujero negro entre nosotros y la estrella de Boyajian, no esperaríamos una atenuación, sino un aumento de brillo que, desde luego, no vemos. Así que parece que podemos olvidarnos del agujero negro... ¿o no?

No del todo. Una posibilidad reside en un agujero negro distante y situado entre la estrella de Boyajian y nosotros. Supongamos que alrededor de dicho objeto orbitase un extenso disco de material frío (como los anillos de Saturno, pero mayores que todo nuestro sistema solar), y que este poseyese una región exterior casi transparente y una interior más densa. Semejante estructura podría haber causado la atenuación a largo plazo a medida que su fina región exterior y, más tarde, su densa zona interior se hubiesen ido interponiendo en nuestra línea de visión a lo largo de los últimos cien años. En tal caso, las caídas irregulares de brillo podrían deberse a las sombras proyectadas por los anillos y otras subestructuras del disco en tránsito. Un agujero negro de este tipo (y su hipotético disco) habría burlado los esfuerzos de Boyajian basados en obtener imágenes de alta resolución, puesto que él mismo no emitiría ninguna luz.

Dado que no tenemos ninguna prueba observacional de que existan agujeros negros rodeados de discos fríos y extensos, este escenario puede parecer un tanto inverosímil. Sin embargo, los teóricos han predicho la creación de este tipo de estructuras en los agujeros negros de masa estelar originados por supernovas. Por otra parte, los cálculos estadísticos indican que un agujero negro de estas características podría haber pasado por delante de al menos una de las 150.000 estrellas observadas por Kepler durante sus cuatro años de estudio. En nuestra opinión, esta hipótesis resulta medianamente plausible.

MEGAESTRUCTURAS ALIENÍGENAS

Después de haber examinado un buen número de explicaciones naturales para el extraño comportamiento de la estrella de Boyajian, y después de haberlas hallado insatisfactorias, podemos considerar la posibilidad más sensacional de todas: una megaestructura alienígena como las que Dyson describió hace más de medio siglo.

Imaginemos que una civilización extraterrestre hubiera construido un gran número de paneles para captar la energía de su estrella, los cuales exhibiesen todo un abanico de tamaños y órbitas alrededor del astro. El efecto conjunto de los paneles de menor tamaño consistiría en bloquear una pequeña parte de la luz estelar, como si se tratase de una pantalla translúcida.

A medida que las partes más densas del enjambre entrasen y saliesen de nuestra línea de visión, veríamos variaciones del brillo en escalas de tiempo que irían de horas a siglos. Y, como señalara hace más de una década Luc F. A. Arnold, del Observatorio de la Alta Provenza, los paneles o grupos de estructuras especialmente grandes (tal vez mayores incluso que la propia estrella) causarían enormes caídas de brillo esporádicas.

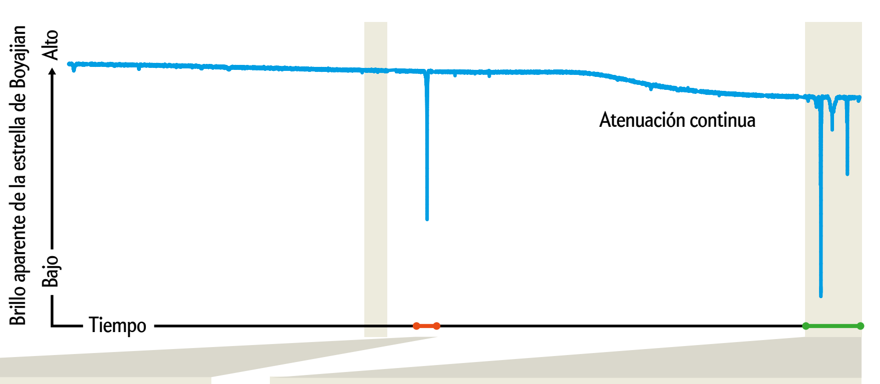
Pero, al igual que con la hipótesis del disco circunestelar, la falta de emisión infrarroja plantea problemas. Hasta las megaestructuras alienígenas han de obedecer las leyes fundamentales de la física, por lo que cualquier energía que interceptasen debería ser, en última instancia, irradiada más tarde en forma de calor. Esta conclusión sigue siendo válida con independencia de cuán eficiente sea la tecnología que consideremos. La energía no puede destruirse; así que, si una civilización está captando una gran cantidad de ella, a la larga también deberá liberarla.

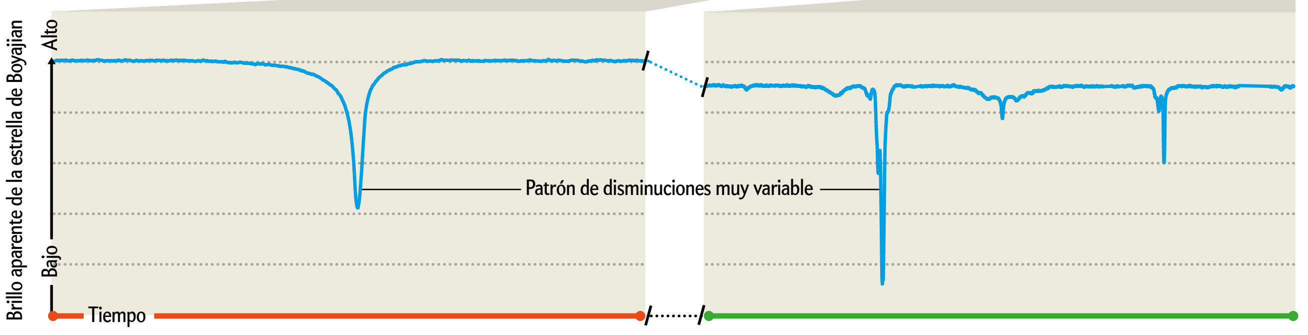
Aun así, hay varias opciones que permiten sostener esta hipótesis: la megaestructura podría reemitir la energía absorbida en forma de señales de radio o láser, en vez de calor; los paneles podrían no formar un enjambre esférico, sino un anillo alineado con nuestra línea de visión; o tal vez se trate de una tecnología más allá de nuestra comprensión que no emita nada de calor. Debido al gran número de incógnitas, resulta muy difícil poner a prueba esta hipótesis.

Si se descartan todas las explicaciones naturales, habremos de considerar seriamente la posibilidad de la megaestructura alienígena. Esta recibiría un espaldarazo si detectásemos señales de radio de apariencia artificial procedentes de las inmediacio-

El caso de la estrella de Boyajian

Este astro exhibe una curva de luz extraordinariamente irregular. Algunas disminuciones de brillo duran días; otras, meses. En ocasiones el brillo apenas se reduce, pero en otras lo hace hasta en un 20 por ciento. Además, los datos de archivo indican que el astro pudo haberse oscurecido en un 15 por ciento durante el siglo pasado. Estos fenómenos no pueden explicarse a partir de planetas en tránsito, discos de gas y polvo o manchas estelares, lo que ha llevado a los astrónomos a buscar interpretaciones exóticas; entre ellas, que una civilización extraterrestre haya construido un enjambre de megaestructuras en torno a la estrella





TIFFANY FARRANT-GONZALEZ (*gráfico*); FUENTE: «KIC 8462852 FADED THROUGHOUT THE *KEPLER* MISSION», BENJAMIN T. MONTET Y JOSHUA D. SIMON EN *ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS*, VOL. 830, N.° 2, ART. L39, 20 DE OCTUBRE DE 2016.

nes de la estrella. En colaboración con Boyajian, ya hemos comenzado a explorar esta posibilidad con el Telescopio de Green Bank, en Virginia Occidental. Por ahora, nuestro veredicto sobre la hipótesis más espectacular de todas para explicar el comportamiento de la estrella de Boyajian es que su plausibilidad no está clara: no sabemos lo suficiente para asignar una probabilidad, ni siquiera cualitativa, a las acciones de una hipotética civilización extraterrestre.

UN FUTURO DESCONOCIDO

¿Dónde nos deja todo lo anterior? Podemos descartar cualquier explicación que implique detectar un exceso de radiación infrarroja, puesto que este no se observa. También podemos rechazar los escenarios que requieran la concurrencia de varios eventos poco probables, o aquellos que recurran a física o astros que no hemos visto nunca, al menos hasta que hayamos eliminado todas las demás opciones.

El mejor camino pasa por continuar investigando. Boyajian, ahora profesora en la Universidad Estatal de Luisiana, aprovechó la fascinación del público para organizar una exitosa campaña de financiación colectiva, la cual nos ha permitido obtener tiempo de observación en la Red Global de Telescopios del Observatorio de Las Cumbres, con varios instrumentos distribuidos por todo el mundo. Observamos la estrella varias veces al día y, si su brillo disminuye de nuevo, tenemos a nuestra disposición varios telescopios listos para medir el espectro de la luz que falta, lo que nos permitiría inferir la composición del material que la absorbe.

Mientras tanto, otros astrónomos están analizando los datos de archivo para entender mejor la atenuación a largo plazo. Conocer la escala de tiempo de este oscurecimiento paulatino nos permitiría imponer nuevos límites sobre las distintas hipótesis y nos ayudaría a buscar nuevas pistas observacionales.

También estamos esperando a que la misión Gaia, de la ESA, aporte datos más precisos sobre la distancia a la que se encuentra la estrella de Boyajian. Si el astro se halla a menos de 1300 años luz, la extinción causada por el gas y el polvo del medio interestelar no podría explicar el nivel de atenuación actual. Si, por el contrario, está a unos 1500 años luz (la mejor estimación en estos momentos), la atenuación a largo plazo podría tal vez deberse a configuraciones fortuitas de polvo a lo largo de la línea de visión. Pero si la distancia resulta ser mucho mayor, eso significaría que la estrella es mucho más luminosa de lo que pensábamos, en cuyo caso el oscurecimiento podría indicar el retorno a la normalidad tras una fusión con otro astro, como ha propuesto el equipo de Metzger.

Mientras esperamos los resultados de Green Bank, Las Cumbres y Gaia, nuestras especulaciones sobre la estrella de Boyajian solo estarán limitadas por nuestra imaginación y por una saludable dosis de física. Como pasa con los mejores enigmas de la naturaleza, el viaje hacia la verdad que esconde esta enigmática estrella no ha hecho más que empezar.

PARA SABER MÁS

Transit light-curve signatures of artificial objects. Luc F. A. Arnold en *Astrophysical Journal*, vol. 627, n.° 1, págs. 534-539, julio de 2005.
Planet Hunters IX: KIC 8462852 — Where's the flux? Tabetha S. Boyajian et al. en *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 457, n.° 4, págs. 3988-4004, abril de 2016.
KIC 8462852 faded throughout the Kepler mission. Benjamin T. Montet y Joshua D. Simon en *Astrophysical Journal Letters*, vol. 830, n.° 2, art. L39, octubre de 2016.
Avalanche statistics identify intrinsic stellar processes near criticality in KIC 8462852. Mohammed A. Sheikh et al. en *Physical Review Letters*, vol. 117, n.° 26, art. n.° 261.101, diciembre de 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

Los anillos de un supersaturno. Matthew Kenworthy en *IyC*, marzo de 2016.



POLÍTICA ENERGÉTICA

LA INDIA, UNA ENCRUCIJADA ENERGÉTICA

Las decisiones que tome la INDIA en materia de energía en los próximos años podrían tener una honda repercusión en el CALENTAMIENTO GLOBAL DURANTE ESTE SIGLO

Varun Sivaram



NUEVA DELHI bajo una espesa nube de polución emitida por los vehículos diésel. Diez de las veinte ciudades más contaminadas del mundo se hallan en la India.

Varun Sivaram, físico de formación, es miembro del Consejo de Relaciones Exteriores y director del Programa de Seguridad Energética y Cambio Climático. También imparte clases de innovación energética en la Universidad de Georgetown.





PÁGINAS ANTERIORES: ROBERTO SCHMIDT, GETTY IMAGES; EN ESTA PÁGINA: JONAS GRATZER, GETTY IMAGES

ERA 2015. EL ESPEJEO DE UNA CASCADA ATRAÍA A LOS visitantes hacia el pabellón que la India tenía en la cumbre del cambio climático que se celebraba en París. Una serie de exposiciones multimedia y un desfile de ponentes proclamaban en su interior que la nación se encaminaba deprisa hacia un futuro de energía limpia. El primer ministro, Narendra Modi, llegó aún más lejos al anunciar que su país encabezaría una nueva Alianza Solar Internacional que fomentaría la energía solar en 120 países. Los dirigentes indios habían resuelto encabezar la lucha contra el cambio climático.

Yo había llegado a París tras haber realizado un viaje de investigación por la India y me costaba reconciliar aquel optimismo con los hechos que había observado sobre el terreno. El país dependía en exceso del carbón. La red eléctrica, deficiente, no podría soportar grandes aportes adicionales de energía eólica o solar. La postura de que la India, como país en vías de desarrollo, no tenía que reducir sus emisiones de carbono, de que tenía que poder crecer quemando combustibles fósiles, como habían hecho otros grandes países, era general. Aun así, al finalizar la cumbre, la India y otras 194 naciones, junto con la Unión Europea, adoptaron el Acuerdo de París, que comprometía al mundo a limitar el calentamiento global a dos grados centígrados. El acuerdo entró en vigor en noviembre de 2016.

Pese a la elevada retórica de los dirigentes indios, su anunciado futuro de energía limpia dista mucho de estar garantizado. Si bien la India prometía alcanzar unos ambiciosos objetivos en materia de energía solar y eólica, su compromiso general de reducir las emisiones era decepcionante. Si el Gobierno se limitara a quedarse de brazos cruzados, las emisiones se dispararían y, sin embargo, el país seguiría encontrándose dentro de los estratosféricos límites que la nación se marcó en París.

Las consecuencias serían desastrosas para el planeta. La economía de la India presenta uno de los crecimientos más acelerados del mundo y se espera que la población del país alcance los 1600 millones hacia el año 2040. Para entonces, la demanda eléctrica podría haberse cuadruplicado. Si la nación no toma medidas drásticas, a mediados de siglo podría ser la mayor emisora de gases con efecto invernadero (actualmente ocupa el tercer puesto, detrás de China y los Estados Unidos), aprisionada en una infraestructura pensada para los combustibles fósiles. Una infraestructura que, si se mantiene así, probablemente echará a perder la cruzada mundial contra el cambio climático. Si el país genera con carbón la energía eléctrica que va a necesitar para cubrir su creciente demanda, sus emisiones de gases de efecto invernadero seguramente se habrán duplicado para 2040.

Con todo, en algunos sentidos la India empieza de cero. A diferencia del mundo desarrollado, donde el reto consiste en sustituir las instalaciones empleadas para explotar combustibles fósiles sucios por otras destinadas a la energía limpia, la mayor parte de la infraestructura de la India está todavía por construir. El país tiene así la oportunidad de invertir en energía eólica, energía solar y gas natural en lugar de carbón. Por otro lado, una mayor eficiencia de los aparatos eléctricos, las fábricas y los vehículos frenaría la demanda y facilitaría de esa manera la transición hacia formas de energía más limpias. Recientemente, el Gobierno indio ha dado a entender que quizá mejore el decepcionante compromiso que adoptó en París. Pero, de momento, el gigante energético sigue tirando hacia delante. ¿Qué factores podrían encauzar a la India hacia una vía más limpia? ¿Qué decisiones podrían abocar al planeta al desastre?

EN SÍNTESIS

La población y el nivel de vida de la India han aumentado rápidamente. Si no cambia la gestión energética del país, hacia 2040 sus emisiones de carbono impedirán que el calentamiento global se limite a los niveles deseados.

Para reducir sus emisiones, la India debe construir una red eléctrica fiable que pueda recibir el aporte adicional de la energía solar y eólica y lograr que se pase de las centrales de carbón a las de gas natural.

El país también necesita reformar un sector energético en bancarrota, aprobar regulaciones de eficiencia energética más estrictas e invertir en un transporte limpio. Para ello será crucial contar con ayuda exterior, tanto técnica como económica.



LOS INCENDIOS originados por cigarrillos, rayos o la combustión espontánea que se producen desde hace décadas en las inmensas minas de carbón de Jharia emiten incesantemente gases tóxicos y dióxido de carbono.

MÁS ENERGÍA PARA TODOS

Las fuentes de energía primitivas y sucias predominan en la India. Dos tercios de los hogares siguen dependiendo del estiércol de vaca, la paja, el carbón vegetal y la leña para cocinar y calentarse, lo que da cuenta de casi una cuarta parte del suministro energético primario de la nación. El resto de la energía procede, casi en su totalidad, del carbón y del petróleo. Las centrales de carbón generan tres cuartas partes de la electricidad, y la mitad de las industrias del país queman carbón para generar el calor que necesitan sus diferentes procesos, como la fundición de acero. Por lo demás, el petróleo impulsa casi todo el sector del transporte.

Si bien estos combustibles fósiles son en primera instancia baratos, su uso tiene graves repercusiones. Además de contribuir al cambio climático, intensifican la contaminación urbana: 10 de las 20 ciudades más contaminadas del mundo se encuentran en la India. Las centrales de carbón consumen ingentes volúmenes de agua. Por otra parte, la creciente dependencia del carbón extranjero y de las importaciones de petróleo vuelve inestable la economía; de hecho, la divisa india ha sufrido rápidas devaluaciones durante las crisis globales del petróleo.

El camino más prometedor hacia una energía limpia y moderna pasa por el sector eléctrico. A medida que el coste de las fuentes de energía renovable desciende, estas resultan cada vez más competitivas con respecto al carbón. Y el petróleo podría perder su hegemonía en el transporte si se fomentase el uso de motocicletas, coches y camiones eléctricos.

Pero nada de esto es fácil. Apenas 300 millones de indios tienen acceso a la red eléctrica. Muchos millones más la tienen al alcance de la mano, pero carecen de un suministro fiable debido al deficiente estado del tendido; un tendido que, desde luego, no se halla en condiciones de asimilar un aporte adicional de energía solar o eólica. Por dar un ejemplo, en mi viaje previo a la cumbre de París presencié cómo unas tormentas terribles dejaban a miles de personas sin electricidad durante semanas.

A pesar de esa realidad, el Gobierno de Modi ha dispuesto unos planes esperanzadores. En París prometió que incrementaría el porcentaje de electricidad generada por fuentes distintas de los combustibles fósiles desde el 24 por ciento actual hasta un 40 por ciento en 2030. A finales de 2016 llegó todavía más lejos y amplió su previsión a un 60 por ciento, una meta verdaderamente ambiciosa. Hoy, la electricidad que no se genera a partir de combustibles fósiles es en su mayoría de origen hidroeléctrico, pero las dificultades a la hora de obtener permisos, adquirir terrenos y negociar compensaciones para los desplazados por los embalses suelen echar por tierra la mayoría de los proyectos de construcción de centrales hidroeléctricas. Un mayor protagonismo de los reactores nucleares también puede descartarse, a la vista de los retrasos crónicos en su construcción.

La modificación más importante perseguida por el Gobierno para alcanzar dicho objetivo del 60 por ciento consiste en ampliar la producción de energía solar y eólica hasta los 350 gigavatios para 2030. De ellos, 250 procederían de la energía solar, una cifra que bien podría superar el 80 por ciento de toda la capacidad solar existente hoy en el planeta. Aunque ambicioso, el objetivo se ha vuelto cada vez más realista gracias al decreciente coste de la energía solar, que en la India se ha reducido en dos tercios en los últimos

1



2



LAS MICRORREDES pueden proporcionar energía a poblaciones a las que no llega el tendido eléctrico. Paneles solares suministran energía a la microrred de una aldea (*1*). Un conjunto de baterías almacena energía solar para alimentar otra microrred (*2*).

PRASHANTH VISHWANATHAN, GETTY IMAGES

cinco años. En estos momentos, una nueva central solar cuesta menos que una nueva de carbón que queme carbón importado, y hacia 2020 costará menos que una que consuma carbón nacional. Por último, el Gobierno y una serie de donantes extranjeros están invirtiendo en una red nacional de líneas de transmisión, conocidas como «corredores verdes», las cuales conectan áreas soleadas, como el desierto de Thar, en el estado de Rajastán, con ciudades lejanas, como Bombay y Delhi.

El Gobierno también se ha planteado ambiciosos objetivos relativos a la energía solar generada en tejados de edificios urbanos y en poblaciones remotas a las que no llega el suministro eléctrico. A los indios les gusta recordar que su industria de telecomunicaciones fue capaz de saltar de una modesta infraestructura de líneas telefónicas terrestres a una extensa red de telefonía móvil. Argumentan que, de forma análoga, la India debería ser capaz de pasar de no tener siquiera un tendido eléctrico que llegue a todas partes a adoptar sistemas de energía solar locales que no necesiten una red nacional. De hecho, la energía solar producida en tejados prácticamente se ha duplicado en cada uno de los cuatro últimos años.

Todo ello puede ser cierto. Pero los grandes parques solares son mucho más baratos, y una red general puede hacer funcionar muchos más aparatos eléctricos modernos que las pocas bombillas y ventiladores que puede alimentar la típica instalación solar remota. Por tanto, la estrategia óptima parece consistir en contar al mismo tiempo con energía centralizada y descentralizada, así como en ampliar y actualizar la red. Mientras tanto, las baterías y los paneles solares distribuidos, especialmente cuando se encuentran interconectados formando una microrred capaz de abastecer a un barrio, hospital o centro de datos, pueden hacer que el sistema entero aguante mejor.

LA SOLUCIÓN DEL GAS NATURAL

Con todo, la demanda energética crecerá más rápido que la capacidad de las empresas para generar energía renovable. Y, por otro lado, se requieren otras fuentes controlables de energía a fin de equilibrar la impredecible producción de energía eólica y solar, ambas en auge. De momento, el almacenamiento en baterías resulta demasiado caro para implantarlo a gran escala.

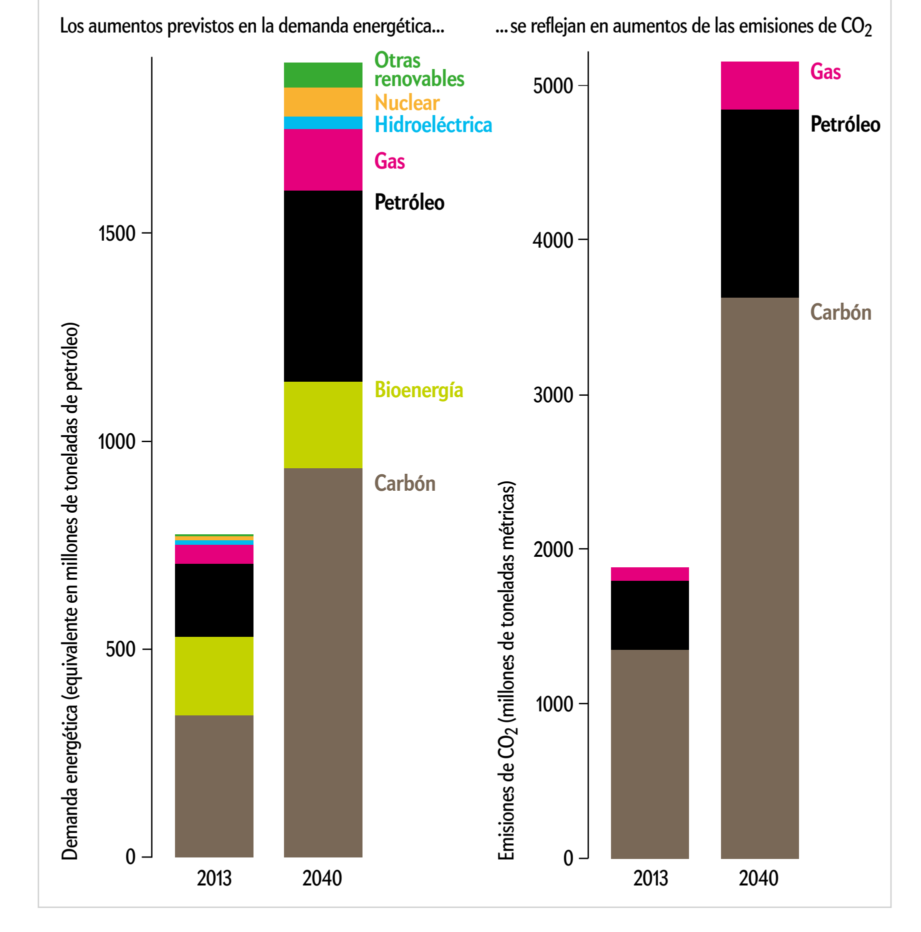
El gas natural podría solucionar ambos problemas. En Estados Unidos, las emisiones de dióxido de carbono asociadas a la generación de energía han disminuido en casi un 15 por ciento a lo largo de los últimos diez años. Ello se debe, sobre todo, a que el carbón se está viendo reemplazado progresivamente por el gas natural, el cual emite la mitad de carbono. En la India, el gas natural genera solo el 8 por ciento de la electricidad, ya que la producción interna es mínima, el precio del gas importado era alto y los Gobiernos anteriores prefirieron recurrir al abundante carbón del país. Pero la oferta mundial de gas natural licuado está creciendo (con gas de Australia, África e incluso Estados Unidos), lo que está provocando una fuerte caída de los precios en Asia.

Además de que resulta más barato y rápido construir centrales de gas que de carbón, las de gas pueden aumentar o disminuir su producción de manera controlada y compensar así la variabilidad asociada a la generación eólica y solar. Dado que el gas natural también podría sustituir al carbón y al petróleo en las plantas industriales y en la calefacción de los edificios, e incluso podría servir como combustible para el transporte, cabría reducir las emisiones todavía más. Vikram Singh Mehta, director de Brookings India y antiguo director de Shell India, sostiene que la política energética del país debería dar especial importancia a las infraestructuras de gas natural. Para importar gas natural licuado, la India ne-

PREVISIONES

El consumo de energía y las emisiones aumentan

Si la población y la economía indias crecen según lo previsto, hacia 2040 podría duplicarse su demanda energética. Y si la política nacional se ajusta al compromiso adoptado en París en 2015, su modelo energético solo cambiará lentamente, por lo que las emisiones de carbono también se duplicarán con creces (*abajo*). Un mayor uso de gas natural y de energía eólica y solar; una transición hacia los vehículos eléctricos, y una mejora de la eficiencia podrían acelerar el cambio y reducir las emisiones.



FUENTE: *INDIA ENERGY OUTLOOK: WORLD ENERGY OUTLOOK SPECIAL REPORT 2015*. ORGANIZACIÓN PARA LA COOPERACIÓN Y EL DESARROLLO ECONÓMICOS/AGENCIA INTERNACIONAL DE LA ENERGÍA, 2015

cesitará realizar grandes inversiones en una red nacional de gasoductos y terminales de regasificación.

Puede que el Gobierno de Modi esté escuchando. Recientemente prometió que a partir de 2022 no se construirían más centrales de carbón, ni públicas ni privadas. Y también ha anunciado que empleará más gas natural, algo que a su vez ayudaría a hacer realidad la primera promesa.

EFICIENCIA ENERGÉTICA

Sin embargo, a pesar de esa transición hacia las energías renovables y el gas natural, el carbón y el petróleo seguirán dominando la combinación energética de la India durante el futuro inmediato. Por ello, Navroz Dubash, del Centro de Investigación sobre Políticas Públicas, en Nueva Delhi, considera fundamental invertir más en una economía eficiente desde el punto de vista energético. Si la India alcanzase el grado de eficiencia que algunos desean, podría convertirse en un magnífico ejemplo de país en vías de desarrollo que consigue crecer económicamente sin el correspondiente aumento de la demanda energética y de las emisiones.

Aunque la Agencia Internacional de la Energía estima que, de no poner medidas, hacia 2040 la India necesitará multiplicar por cuatro la oferta eléctrica, una mejora radical de la eficiencia podría limitar ese aumento a solo el doble. En particular, la mejora de la eficiencia en las fábricas tendría una honda repercusión. Hoy la industria consume más del 40 por ciento de la energía de la India. Bastaría con la adopción de dispositivos eficientes y la sustitución del carbón por gas natural o electricidad en la fabricación de acero, ladrillos y abonos para que se ahorrasen ingentes cantidades de energía y de emisiones de carbono.

Los edificios del país también ofrecen una buena ocasión para cambiar. Nada más y nada menos que tres cuartas partes de las estructuras que existirán en 2040 no se han construido todavía. La electricidad requerida por hogares y negocios podría dispararse, especialmente al extenderse el uso del aire acondicionado, así que resulta imprescindible que los nuevos edificios de la India gestionen la electricidad de forma económica.

La India se halla ya a la cabeza en la implantación de medidas para abaratar los productos energéticamente eficientes. Un gran éxito en este sentido ha sido el cosechado hace poco por la empresa Energy Efficiency Services Limited, que adquiere equipamiento a gran escala y lo distribuye a bajo precio. La iniciativa ha vendido más de 200 millones de lámparas led de gran eficiencia a un coste similar al de las bombillas incandescentes tradicionales, lo que ha reducido el precio de los ledes por debajo del de los países occidentales. También está comenzando a efectuar pedidos de aparatos de aire acondicionado eficientes para estimular la innovación de los fabricantes. Si el éxito continúa, el mercado irá redirigiendo las inversiones hacia la mejora de los aparatos electrónicos a medida que millones de nuevos indios de clase media demanden servicios modernos.

El país también podría combatir las crecientes emisiones asociadas al transporte. En la actualidad, este sector consume solo el 14 por ciento de la energía nacional, ya que muy pocos indios poseen un vehículo. Sin embargo, hacia 2040 la demanda de combustible podría superar el triple del valor actual como consecuencia de unos ingresos más altos y de un mayor deseo por comprar coches. Hace poco, las autoridades han exigido que los vehículos nuevos sean cada vez más eficientes en el consumo de combustible. Pero el país podría invertir masivamente en la infraestructura necesaria para la recarga de vehículos eléctricos a fin de que hacerlos más atractivos, lo que facilitaría que las energías renovables redujesen las emisiones de los automóviles. Dado que los vehículos de dos o tres ruedas suponen más del 80 por ciento de las ventas actuales del sector, el Gobierno podría dar rápidamente un giro hacia la energía eléctrica promocionando a corto plazo las motocicletas y motocarros eléctricos. Y si los planificadores urbanos consiguen implantar un sistema de transporte público eficaz, ello tal vez redujese el deseo de la población de adquirir un automóvil.

La mejora del transporte urbano podría, además, salvar millones de vidas. En la India, la polución y las partículas contaminantes, emitidas sobre todo por vehículos diésel, asfixian a las grandes ciudades como Delhi, cuestan 18.000 millones de dólares anuales en forma de pérdidas de productividad económica y causan más de un millón de muertes prematuras al año.

Aprovechar la energía solar también podría aligerar los sobrecargados sistemas de producción de alimentos y agua. Un proyecto piloto que se va a llevar a cabo en el sur de la India empleará espejos solares concentradores para generar vapor, el cual accionará turbinas para destilar agua y refrigerará alimentos. El Gobierno también está desplegando a gran escala paneles solares que, en 2019, suministrarán energía a 200.000 bombas de riego. El objetivo es que, en un futuro, 26 millones de bombas que hoy dependen del diésel o de la red eléctrica acaben funcionando con energía solar.

UN BAÑO DE REALIDAD

En mis conversaciones con compañías extranjeras y nacionales, especialmente del sector solar, me he visto sorprendido por un marcado contraste de perspectivas. Las empresas extranjeras ven un mercado lucrativo que crecerá a un ritmo sin precedentes. Por el contrario, los directores de las compañías indias se burlan en privado. Su pesimismo procede de su experiencia con el disfuncional sector energético de la India, la falta de fondos para proyectos destinados a infraestructuras y un panorama político polémico y en ocasiones corrupto. Las trabas impuestas por el propio país dificultan la puesta en marcha de una estrategia de energía limpia.

En primer lugar, como ya se ha mencionado, la maltrecha red eléctrica no está preparada para soportar ni el más pequeño aumento de fuentes renovables, y la situación no hará más que empeorar. Por ejemplo, como consecuencia de la sequía, agravada por el cambio climático, los granjeros emplean un mayor número de bombas de riego que se adentran cada vez más en el subsuelo y, por tanto, consumen más electricidad. En 2012, un aumento masivo del bombeo causó el mayor apagón de la historia de la humanidad. Las compañías eléctricas, ya en bancarrota, no pueden permitirse actualizar una red tan debilitada,

atrapadas en un círculo vicioso en el que cobran menos a los clientes por la electricidad, terminan endeudadas y sin poder afrontar el mantenimiento de la red o la lucha contra los cada vez más frecuentes robos de electricidad.

En segundo lugar, la escasa financiación privada y una enrevesada regulación dificultan considerablemente la construcción de infraestructuras. El problema radica en que alcanzar los objetivos de la India en materia de energías renovables requerirá una inversión de 150.000 millones de dólares para 2020, mucho más dinero del que el Gobierno puede movilizar. Aquí, de nuevo, se ha caído en otro círculo vicioso, ya que los bancos han concedido grandes préstamos para proyectos que ahora se encuentran paralizados (especialmente en el sector energético) y no se encuentran en posición de realizar mayores inversiones. A menudo cobran intereses exorbitantes, mientras que los escurridizos permisos del Gobierno y los impedimentos para comprar terrenos pueden retrasar o sentenciar los proyectos de energía limpia.

Si la India no toma medidas drásticas, a mediados de siglo podría ser la mayor emisora de gases de efecto invernadero, lo que echaría a perder la lucha contra el cambio climático

En tercer lugar, la manera de gobernar y la espinosa política del país pueden impedir la toma de medidas sensatas. Por ejemplo, aunque el Gobierno de Modi se proponga grandes metas en materia de energía solar y eólica, su implementación se estanca principalmente en los estados federales de la India, que con frecuencia se muestran reacios a actuar. Con el fin de suprimir los despilfarradores subsidios para combustible, Modi lanzó una iniciativa con la que consiguió elevar los precios de la gasolina y del diésel, pero no pudo aumentar los del gas para cocinar y el queroseno debido a la falta de apoyo político. Y mientras se continúe vendiendo el gas natural por debajo de los precios de mercado, las compañías no pondrán en marcha grandes iniciativas de inversión en la perforación de nuevos pozos que lleven a un aumento de la producción nacional.

Por último, el impuesto que la administración de Modi cobra a las empresas del carbón no solo ha levantado la ira de las propias compañías, sino también la de sus clientes, como las siderúrgicas, así como la de los Gobiernos de los principales estados productores de carbón. Tales fuerzas políticas podrían impedir nuevas subidas del impuesto, que actualmente se encuentra muy por debajo de los costes de la contaminación causada por la combustión del carbón.

Se requieren importantes cambios en las políticas de gestión. Una de las prioridades consiste en rescatar a los servicios públicos de sus asfixiantes deudas para que puedan fortalecer la red eléctrica y costear la energía renovable. El Gobierno de Modi ha logrado algunos avances prometiendo pagar las deudas a cambio de mejoras en el suministro de servicios, como reducir las pérdidas de energía en la red, las cuales pueden llegar a superar la cuarta parte del aporte inicial. La administración podría progresar aún más si se redujese la influencia de los estados del país sobre las compañías eléctricas, de modo que estas no se viesen forzadas a abaratar las tarifas para beneficiar a los políticos. Otra prioridad consiste en endurecer las normas relativas a la eficiencia de la industria. Por otra parte, los políticos podrían acelerar la concesión de permisos para construir gasoductos, centrales de gas e infraestructuras para importar gas natural licuado. También podrían reforzar las iniciativas de captura del carbono, como ha empezado a hacer una planta química en el sur del país. O, lo que sería aún mejor, podrían adelantar la fecha a partir de la cual no se construirán más centrales de carbón y fijarla para antes de 2022. Todo ello requerirá que tanto los Gobiernos de cada estado del país como el federal colaboren entre ellos, así como valentía política frente a los grupos de presión industriales. La forma más efectiva de establecer una alianza política consiste en hacer atractivas, desde el punto de vista económico, las infraestructuras de energía limpia, algo que han conseguido iniciativas como la de Energy Efficiency Services Limited para estimular la fabricación local.

AYUDA EXTERNA

La India no logrará por sí misma la transición hacia una reducción de las emisiones de carbono. Necesitará ayuda para desarrollar nuevas tecnologías y financiar su puesta en marcha. Algunos hechos son alentadores: el país mantiene alianzas con Estados Unidos en materia de investigación y desarrollo de energía limpia, con Alemania en lo relativo a la financiación de la red eléctrica, y con bancos de desarrollo multilateral para la implantación de energías renovables.

La ayuda deberá aumentar en al menos un orden de magnitud. Si no, lo más probable es que la India continúe instalando centrales de carbón ineficientes, engullendo petróleo extranjero y lidiando con una red eléctrica maltrecha. En lugar de esperar que la nación logre por sí misma construirse un futuro de bajas emisiones de carbono, los líderes extranjeros deberían ayudar más al país para que pueda conseguirlo. Hay un importante incentivo económico: al acelerar la transición energética de la India, los países abrirían a sus industrias de energía limpia un lucrativo mercado de exportación. Y hay un imperativo aún mayor: está en juego el futuro del planeta. IyC

PARA SABER MÁS

India energy outlook: World energy outlook special report 2015. Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos/Agencia Internacional de la Energía, 2015.

Reach for the sun: How India's audacious solar ambitions could make or break its climate commitments. Varun Sivaram, Gireesh Shrimali y Dan Reicher. Centro Steyer-Taylor para la Política y Economía Energética, Universidad Stanford, 8 de diciembre de 2015.

India's energy and climate policy: Can India meet the challenge of industrialization and climate change? Charles K. Ebinger. Brookings Institution, junio de 2016.

Energizing India: Towards a resilient and equitable energy system. Suman Berry et al. SAGE Publications, 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

Energía y cambio climático. Gary Stix en *IyC*, noviembre de 2006.

El lento ascenso de las renovables. Vaclav Smil en *IyC*, marzo de 2014.

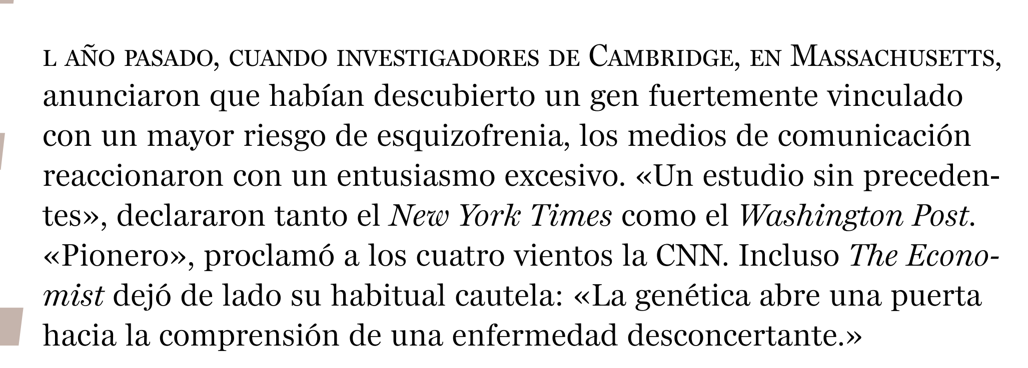


NEUROCIENCIA

LOS INEXORABLES MISTERIOS DE LA ESQUIZOFRENIA

SE SUPONÍA QUE LOS ESTUDIOS GENÉTICOS REVELARÍAN LAS BASES DE LA ENFERMEDAD, PERO NO HA SIDO ASÍ. LOS CIENTÍFICOS BUSCAN AHORA NUEVAS PISTAS

MICHAEL BALTER



El año pasado, cuando investigadores de Cambridge, en Massachusetts, anunciaron que habían descubierto un gen fuertemente vinculado con un mayor riesgo de esquizofrenia, los medios de comunicación reaccionaron con un entusiasmo excesivo. «Un estudio sin precedentes», declararon tanto el *New York Times* como el *Washington Post*. «Pionero», proclamó a los cuatro vientos la CNN. Incluso *The Economist* dejó de lado su habitual cautela: «La genética abre una puerta hacia la comprensión de una enfermedad desconcertante.»

El revuelo era en cierto modo comprensible. A lo largo de la historia, la investigación sobre la esquizofrenia ha dejado tras de sí un reguero de decepciones. Las bases biológicas de esta enfermedad, uno de los trastornos mentales más desconcertantes y complejos, viene siendo un enigma desde hace mucho tiempo. Sus estragos, sin embargo, han quedado siempre claros: se estima que el coste total derivado del cuidado de los pacientes, solo en EE.UU., asciende a más de 60.000 millones de dólares anuales; dicha cifra incluye los costes sanitarios directos y las pérdidas económicas indirectas provocadas por el desempleo y la muerte precoz. Cualquier descubrimiento que ayudara a comprender las causas de la enfermedad sería un avance médico de primer nivel.

Desde que entraron en escena los estudios genéticos a gran escala, hace algo más de una década, se había albergado la esperanza de que poco después se desarrollarían nuevos conocimientos y tratamientos, que tanto se necesitan.

GROOMING BY AKANE ANJAWI, SUSAN PRICE, INC.; ETHAN HILL (*fotografías*)

Los fármacos antipsicóticos hoy disponibles solo reducen los síntomas más manifiestos, como los delirios y las alucinaciones; además, pueden provocar efectos secundarios graves y poco pueden hacer (o incluso nada) para tratar los síntomas crónicos, como el aislamiento social y los déficits cognitivos.

Sin embargo, los estudios genéticos todavía no se han mostrado a la altura de las expectativas. Los llevados a cabo sobre la esquizofrenia, de gran amplitud, así como los relativos a la depresión y a los trastornos obsesivo-compulsivo y bipolar, han transmitido el mensaje de que muy probablemente no se obtendrán nuevos tratamientos a partir del descubrimiento de un único gen. Y el estudio que dio lugar a los entusiastas titulares del año pasado no fue una excepción. No obstante, tal investigación ofrece por lo menos una visión profunda de las inmensas dificultades que conlleva conocer los procesos mentales que se ven alterados en la esquizofrenia.

EL UNO POR CIENTO

Los que investigan los trastornos psiquiátricos tenían buenas razones para creer que los datos genéticos ayudarían a superar el estancamiento en dicho campo. Durante décadas, los estudios en familias y gemelos han sugerido la existencia de un fuerte componente genético asociado al riesgo de esquizofrenia, algo que ha sido puesto de manifiesto por la frecuencia constante con la que aparece la enfermedad. Se estima que su prevalencia es de un 1 por ciento en todo el mundo, con independencia de las inmensas diferencias ambientales y socioeconómicas presentes en las distintas sociedades. Se sabía también que dicha búsqueda entrañaría dificultad. Los genes que elevaran lo bastante el riesgo de esquizofrenia probablemente serían muy raros en la población general, por lo que solo resultarían relevantes en un pequeño porcentaje de los pacientes. Por otro lado, los genes más comunes tendrían un menor peso en la enfermedad, con lo que costaría mucho más identificarlos. Descubrirlos exigiría una capacidad estadística mayor, lo que, a su vez, implicaría trabajar con tamaños de muestra grandes (decenas de miles de pacientes y sujetos de control). Teniendo en cuenta los retos existentes, en 2007 un grupo de científicos creó el Consorcio para la Genómica Psiquiátrica (PGC, por sus siglas en inglés) para estudiar la esquizofrenia y otros trastornos mentales. En la actualidad, el PGC cuenta con más de 800 colaboradores de 38 países y con muestras procedentes de más de 900.000 personas.

Michael O'Donovan, genetista psiquiátrico en la Universidad de Cardiff y director del grupo de trabajo sobre esquizofrenia del PGC, afirma que era fundamental adoptar un enfoque global para conseguir los enormes tamaños de muestra necesarios para llevar a cabo el tipo de trabajo conocido como estudio de asociación del genoma completo (GWAS, por sus siglas en inglés). En julio de 2014, el grupo publicó en *Nature* un artículo sobre un GWAS basado en 37.000 pacientes de esquizofrenia y 113.000 sujetos de control que fue recibido con gran entusiasmo. El estudio identificó 108 genes (regiones genéticas) vinculados con la esquizofrenia; algunos de ellos codifican sistemas de señalización neuronal que constituyen las principales dianas de los fármacos antipsicóticos actuales. Dichas correlaciones hacían pensar que los investigadores iban por el buen camino.

La región genética que mostró un vínculo más fuerte con la esquizofrenia se encarga de codificar proteínas pertenecientes al complejo mayor de histocompatibilidad (CMH), encargado de reconocer moléculas ajenas al organismo y alertar de ello al sistema inmunitario. Tal descubrimiento llevó a Steven McCarroll, genetista del Instituto Broad de la Universidad Harvard y del Instituto de Tecnología de Massachusetts, a pensar que valía la pena realizar estudios más detallados sobre la región CMH. Cuando el equipo de McCarroll profundizó en la investigación, descubrió una variante del *C4*, un gen del CMH, que elevaba el porcentaje de riesgo de esquizofrenia de 1 a 1,27 en las poblaciones estudiadas.

Aunque se trata de un aumento relativamente pequeño, los investigadores sugieren en su artículo que podría aportar indicios acerca del origen de ciertos casos de esquizofrenia. Los resultados con *C4* también fueron importantes por otros motivos. Las variaciones en este gen no solo consisten en diferencias en su secuencia de ADN, sino también en la longitud y el número de copias del gen que posee un individuo en cuestión.

Algunos estudios previos hacían sospechar que ciertas variaciones relativamente infrecuentes en el número de copias desempeñaban un papel importante en la esquizofrenia. De hecho, se sigue debatiendo si es más probable que los genes fundamentales de la esquizofrenia sean variantes poco frecuentes que aumentan drásticamente el riesgo de padecer la enfermedad o versiones comunes que solo incrementan ligeramente dicho riesgo. El nuevo estudio aporta una clara confirmación de la relación entre las variaciones en el número de copias y la esquizofrenia. Y cuando el equipo comparó los cerebros de personas con esquizofrenia, tanto vivas como ya fallecidas, con los de personas sanas, detectaron que en los primeros se generaba una cantidad notablemente mayor de la proteína C4, lo que se asociaba a la presencia de copias adicionales del gen.

Para analizar con mayor detalle los efectos de *C4* a escala molecular, los investigadores utilizaron cerebros de ratón. Beth Stevens, del Instituto Broad, quien dirigió esta parte del estudio, descubrió que la proteína C4 contribuía al desarrollo del cerebro

Michael Balter, biólogo de formación, es periodista científico y ha escrito artículos en *Audubon, National Geographic* y *Science*, entre otras publicaciones.



EN SÍNTESIS

Se esperaba que los estudios genéticos a gran escala ayudarían a descubrir las causas de la esquizofrenia, un trastorno psiquiátrico que provoca, solo en EE.UU., gastos de 60.000 millones de dólares anuales en el cuidado de las personas afectadas. La investigación encaminada a lograr dicho fin empezó hace unos diez años.

Los resultados obtenidos no han estado a la altura de las expectativas. Los estudios realizados han demostrado que ningún gen por sí solo permitirá obtener nuevos tratamientos, y que el intrincado paisaje genético de la esquizofrenia ofrece, en el mejor de los casos, unos débiles indicios sobre las causas de la enfermedad.

Para avanzar será necesario tener en cuenta un conjunto de datos que indican que las influencias recibidas en etapas tempranas de la vida, como traumas infantiles y factores prenatales, exacerban el efecto de los genes, con lo que aumenta el riesgo de la enfermedad.

al realizar una «poda» de las conexiones neurales (sinapsis) que ya no eran necesarias. Tal poda forma parte de la maduración normal del cerebro [*véase* «La plasticidad del cerebro adolescente», por Jay N. Giedd; Investigación y Ciencia, agosto de 2015]. Pero si dicho proceso estuviera sobreactivado y eliminara demasiadas sinapsis, ello aclararía algunas de las características de la esquizofrenia. Podría explicarse entonces el motivo por el que las personas afectadas tienden a presentar una corteza cerebral más delgada y menos sinapsis. Y la esquizofrenia, junto con otras formas de psicosis, suele diagnosticarse por vez primera a finales de la adolescencia o a principios de la edad adulta, cuando la maduración cerebral alcanza sus últimas etapas.

Para algunos científicos, dicho hallazgo significó una reivindicación de los GWAS como una forma relativamente nueva de detectar genes asociados a una enfermedad. Los GWAS han dado lugar a una explosión sin precedentes, extraordinariamente positiva, de nuevos conocimientos acerca de los trastornos mentales, afirma Patrick Sullivan, genetista psiquiátrico de la Facultad de Medicina de la Universidad de Carolina del Norte en Chapel Hill. En lo referente al estudio sobre el *C4*, David Goldstein, director del Instituto de Medicina Genómica de la Universidad de Columbia y que durante mucho tiempo mostró un gran escepticismo acerca del potencial de los GWAS, afirmó que, al apuntar a un posible mecanismo biológico de la esquizofrenia, los nuevos hallazgos representan «la primera vez que hemos obtenido lo que queríamos de un GWAS». Sin embargo, otros científicos, entre ellos algunos genetistas de primer rango, siguen albergando dudas. «Los GWAS no tendrán ningún impacto en la determinación de la biología de las bases biológicas de la esquizofrenia», afirma Mary-Claire King, de la Universidad de Washington, quien en 1990 identificó el gen *BRCA1* como uno de los principales factores de riesgo del cáncer de mama.

La mayoría de los casos de esquizofrenia parecen ser altamente poligénicos, es decir, que en ellos intervienen centenares o quizá miles de genes. «El GWAS muestra que la dolencia es tan extremadamente poligénica que tal vez no haya nada que detectar, aparte de un trasfondo genético no especificable», afirma Eric Turkheimer, genetista conductual de la Universidad de Virginia.

Sin lugar a dudas, podría afirmarse que una de las contribuciones más relevantes de los GWAS, y el estudio de *C4* no fue una excepción, ha sido desengañar a los científicos respecto a las nociones simplistas sobre la genética psiquiátrica. Los nuevos hallazgos han arruinado las esperanzas de poder delimitar la esquizofrenia a una mutación genética, o incluso a varias de ellas. Tal escepticismo viene dado por el descubrimiento de que cada una de las 108 localizaciones genéticas vinculadas hasta el momento con la esquizofrenia explica solo un pequeño porcentaje del riesgo de sufrir dicha enfermedad. Ello hace poco probable que los nuevos descubrimientos permitan obtener tratamientos dentro de poco tiempo. También plantea obstáculos para los neurocientíficos y psiquiatras que confiaban en obtener alguna pista genética que pudiera indicar las raíces de la enfermedad. «Habría sido mucho mejor si hubiera un único gen», afirma Kenneth Kendler, investigador psiquiátrico de la Facultad de Medicina de la Universidad de Virginia. «En tal caso habríamos podido centrar todos los esfuerzos en esa región en cuestión.»

En el caso de *C4*, el reconocimiento de tales limitaciones ha hecho preguntarse hasta qué punto será relevante ese gen para entender la esquizofrenia o desarrollar nuevas terapias. Si bien el 27 por ciento de los casi 29.000 pacientes que participaron en el estudio presentaban la variante de alto riesgo del gen *C4*, alrededor del 22 por ciento de los 36.000 sujetos sanos del grupo de control también la exhibían, según McCarroll. «Incluso si la historia de *C4* es cierta, explica solo un pequeñísimo número de los casos de esquizofrenia», afirma Kenneth Weiss, genetista evolutivo de la Universidad Estatal de Pensilvania. «La utilidad que ello tendrá es discutible.» Y el estudio no demuestra una relación directa entre la poda sináptica y la esquizofrenia, algo que McCarroll y otros profesionales admiten. Su importancia parece residir sobre todo en la posibilidad de identificar los tipos de procesos biológicos implicados.

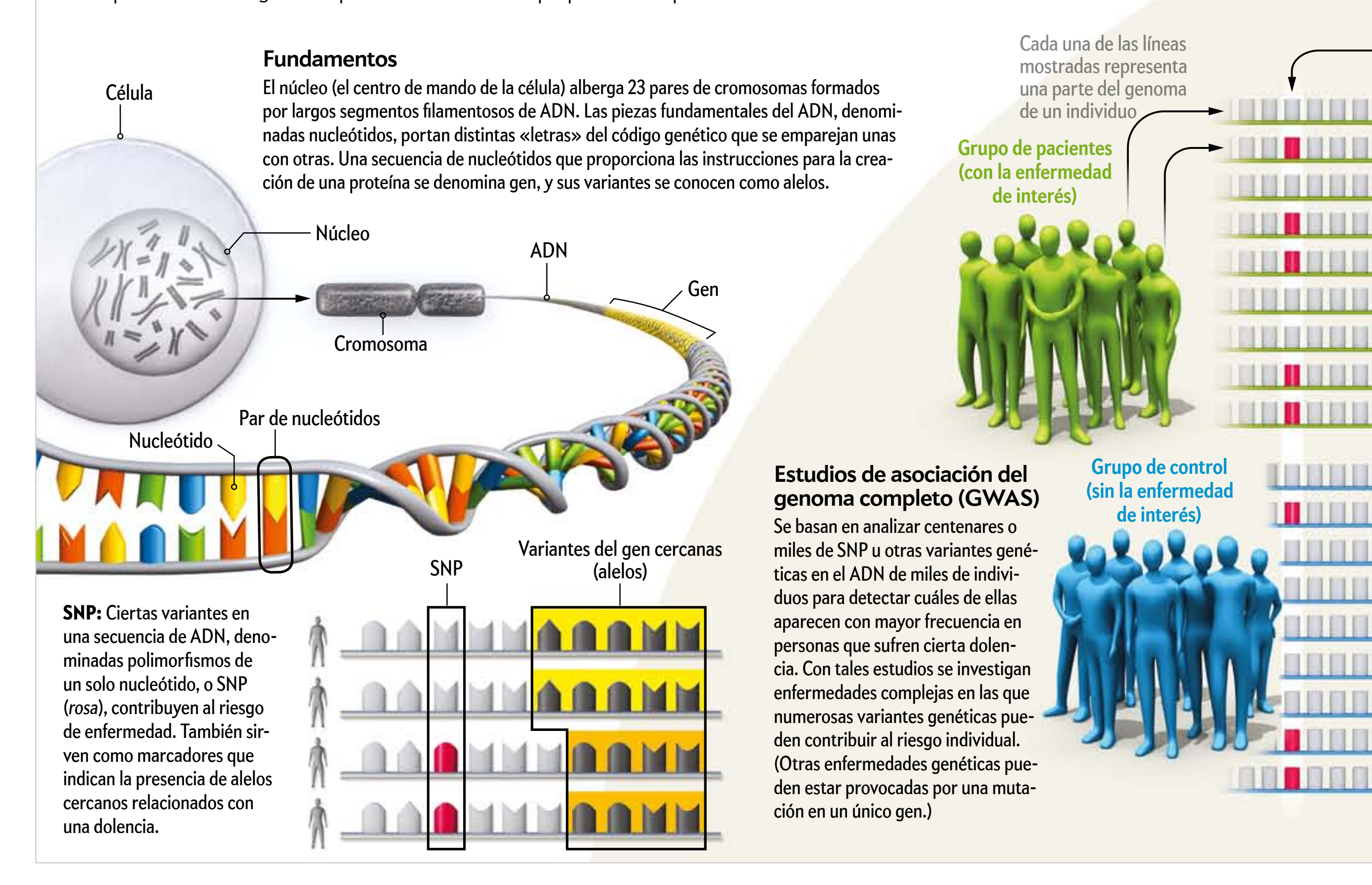
Los GWAS también se enfrentan a otras dificultades. Para reunir muestras de gran tamaño, los genetistas suelen distinguir entre personas enfermas y sanas en función de si han recibido o no un diagnóstico formal de esquizofrenia. Pero los criterios son muy amplios. En los EE.UU., las normas diagnósticas son establecidas por el *Manual diagnóstico y estadístico de los trastornos mentales*, de la Asociación Psiquiátrica Americana, mientras que muchos psiquiatras de otros países se basan en la *Clasificación internacional de enfermedades*, de la Organización Mundial de la Salud. En los criterios establecidos en ambos volúmenes, los pacientes pueden presentar síntomas notablemente distintos, desde delirios y alucinaciones hasta disfunciones cognitivas, y aun así recibir un mismo diagnóstico de esquizofrenia.

Hannelore Ehrenreich, neurocientífica del Instituto Max Planck de Medicina Experimental en Gotinga, describe la esquizofrenia como un diagnóstico que abarca un espectro de disfunciones, más que como una enfermedad en sí: «Nos estamos centrando en personas que se hallan en uno de los extremos de la experiencia humana, que forman parte de un continuo y no de una categoría separada». William Carpenter, psiquiatra de la Facultad de Medicina de la Universidad de Maryland y director editorial de la emblemática revista *Schizophrenia Bulletin*, no va tan lejos, pero reconoce que la esquizofrenia corresponde a un conjunto de trastornos o síntomas y no a una enfermedad nítidamente diferenciada. «Ello la convierte en un objetivo poco adecuado para el descubrimiento de genes», afirma.

Goldstein, que opina que los hallazgos sobre *C4* «son lo mejor que tenemos» para comprender cómo un gen relacio-

La dificultad de identificar los genes responsables

Cuando apareció el primer borrador del Proyecto Genoma Humano en el 2000, la comunidad científica lo consideró el preludio de una era de medicina personalizada que proporcionaría nuevas curas para una gran variedad de enfermedades, incluidos los trastornos psiquiátricos como la esquizofrenia. Los estudios a gran escala que han identificado variantes genéticas que elevan el riesgo de esquizofrenia aún no han proporcionado pistas sólidas sobre nuevos tratamientos.

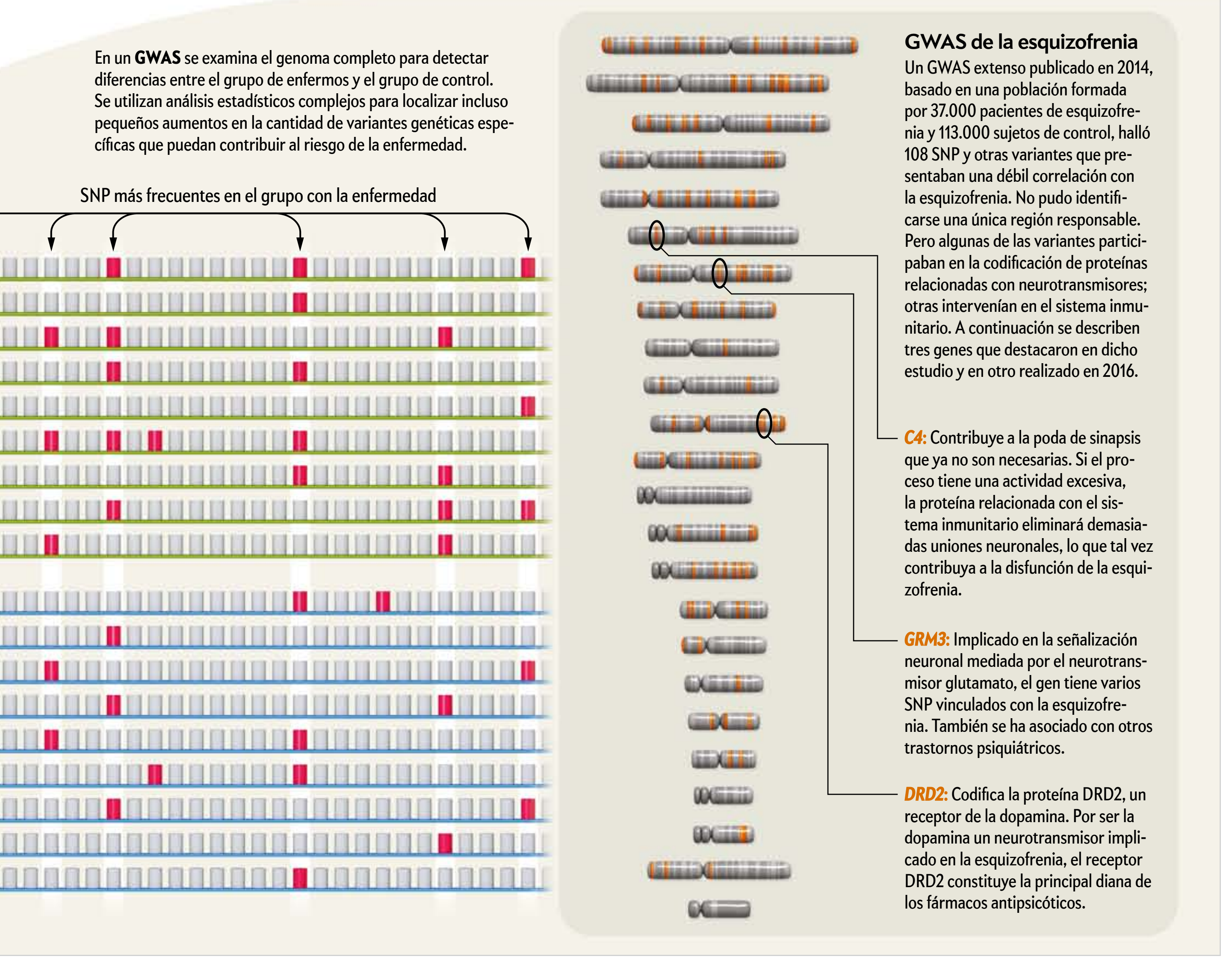


nado con el riesgo de esquizofrenia podría ejercer su efecto, cree, sin embargo, que los investigadores deberían mostrarse mucho más humildes con los resultados de los GWAS. «Los que trabajan en el campo de la genética de la esquizofrenia han sobreinterpretado sus hallazgos.» Parte del mayor escepticismo en lo relativo a la búsqueda de genes asociados al trastorno proviene de los psiquiatras, de los defensores de los pacientes y de antiguos pacientes. El enfoque de los GWAS se centra en obtener nuevos fármacos para disminuir los síntomas, pero los afectados suelen mostrar reservas ante tal objetivo. «La obsesión por reducir los síntomas no se alinea del todo con el punto de vista de los pacientes», afirma Jim van Os, psiquiatra del Centro Médico Universitario de Maastricht. Lo que ellos desean, según el experto, es poder vivir una vida productiva y ser socialmente competentes, y ello se corresponde no necesariamente con estar más medicado.

Van Os, junto con un creciente número de defensores de los pacientes, indica que el término *esquizofrenia* en sí ya forma parte del problema, dado que estigmatiza y deshumaniza a los afectados sin describir adecuadamente su mal. Jim Geekie, psicólogo clínico que trabaja en una unidad de internamiento del Servicio Nacional de Salud británico, en las afueras de Londres, señala: «Conocer el diagnóstico de una persona no me dice casi nada de ella».

De hecho, varios países y regiones de Asia, entre ellos Japón, Corea del Sur, Hong Kong y Singapur, han eliminado por completo dicha clasificación. El término japonés *trastorno de la mente dividida*, utilizado para describir la esquizofrenia, se ha sustituido por *trastorno de integración*, y un término similar en coreano se ha cambiado por *trastorno de adaptación*.

Para muchos investigadores y defensores de los pacientes, el principal problema con la nomenclatura —y con la búsqueda de genes en sí misma— es que lleva implícita la idea de que las personas sufren algún tipo de enfermedad mental. «Si existen variaciones genéticas que hacen aumentar la predisposición a sufrir dichas experiencias, debemos asegurarnos de que el entorno no las desencadene», apunta Jacqui Dillon, presidenta de la Red de Personas que Oyen Voces, del Reino Unido. Dillon, a quien de joven le comunicaron que padecía esquizofrenia y que hoy en día sigue oyendo voces, añade que entender la genética de la esquizofrenia «no cambia el modo en que debemos actuar para evitar que las personas afectadas enloquezcan».



FUENTE: «BIOLOGICAL INSIGHTS FROM 108 SCHIZOPHRENIA-ASSOCIATED GENETIC LOCI», POR SCHIZOPHRENIA WORKING GROUP OF THE PSYCHIATRIC GENOMICS CONSORTIUM, EN *NATURE*, VOL. 511; 24 DE JULIO DE 2014 (*108 SNP details*); EMILY COOPER (*gráficos*)

UN GRAVE DEFECTO

Algunos investigadores afirman que la búsqueda de genes no va por buen camino porque ignora en gran medida el contexto ambiental, así como las circunstancias personales y familiares, los cuales contribuyen al riesgo de esquizofrenia. «El proyecto en su conjunto presenta un defecto grave», asegura el psicólogo de la Universidad de Liverpool Richard Bentall. Tal opinión es especialmente preponderante entre los especialistas clínicos que, como Bentall, tratan directamente a personas con esquizofrenia. Abogan por un aumento de la financiación de las estrategias pragmáticas, no biológicas, que van desde la terapia familiar a la terapia cognitivo-conductual.

En algunas ocasiones, también aparecen dudas acerca de la idea fundamental de que la esquizofrenia es altamente «heredable». Según esta noción, derivada en gran parte de los estudios con familias y con gemelos, se supone (incluso lo creen así muchos científicos) que los factores genéticos desempeñan un papel fundamental. Sin embargo, el concepto de heredabilidad es complejo y no constituye una medida directa de cuán «genético» es un rasgo en particular, como un diagnóstico formal de esquizofrenia.

De hecho, según insisten algunos investigadores, las circunstancias ambientales y sociales otorgan mayor riesgo de esquizofrenia que la mayoría de los genes que han sido identificados hasta el momento. Estudios epidemiológicos han mostrado que los factores de riesgo incluyen desde vivir en un entorno urbano o ser inmigrante hasta sufrir pobreza y abusos emocionales y sexuales.

Aparte de especularse que suponen fuentes de estrés emocional, no se entiende del todo el modo en que tales factores predisponen a la esquizofrenia. Así, un equipo israelí halló recientemente que los supervivientes del Holocausto sufrían mayores índices de esquizofrenia. Otro grupo detectó un aumento del riesgo en personas que habían experimentado la violencia del conflicto en Irlanda del Norte.

Resulta cada vez más evidente que solo es posible avanzar si los investigadores tienen en cuenta una amplia gama de factores de riesgo. Si bien la genética puede aumentar la vulnerabilidad a sufrir trastornos mentales, la influencia de la familia o del entorno social puede provocar que una persona propensa a ellos cruce el umbral, lo que dará lugar a un primer episodio psicótico. La tarea fundamental consiste en comprender cómo interaccio-

Heredabilidad: ¿ausente o simplemente escondida?

Un concepto que parece obvio en realidad no lo es

Los investigadores han estado buscando genes relacionados con la esquizofrenia durante al menos cincuenta años. ¿Qué les hace suponer que los hallarán? La cuestión, planteada en la introducción de casi todos los artículos científicos sobre genética de la esquizofrenia, se basa en la idea de que el trastorno presenta una elevada heredabilidad. Este término suele interpretarse como una medida de la influencia ejercida por los genes, expresada en porcentaje.

Los científicos han calculado la heredabilidad de la esquizofrenia mediante diversas estrategias, incluidos los estudios con gemelos. La mayoría de las estimaciones se mueven alrededor del 80 por ciento. Sin embargo, muchos afirman que los cálculos pueden resultar engañosos y ponen en duda suposiciones clave, como la denominada presunción de un mismo entorno, que considera que tanto los gemelos idénticos como los mellizos están sujetos a las mismas influencias ambientales.

«Estas suposiciones son erróneas», explica Roar Fosse, neurocientífico de la Fundación del Hospital Vestre Viken, en Noruega, quien recientemente realizó un análisis crítico de la mencionada presunción. Pero los investigadores con gemelos defienden dicho enfoque con gran entusiasmo. «No creo que las cifras de heredabilidad actuales estén muy sobreestimadas», afirma Kenneth Kendler, psiquiatra de la Facultad de Medicina de la Universidad de Virginia.

Algunos expresan críticas aún más profundas acerca de la heredabilidad. Afirman que los cálculos técnicos del término no tienen en cuenta el papel relativo desempeñado por los genes y el ambiente. Al contrario, la heredabilidad solo mide hasta qué punto la variación de un rasgo (sea la altura, el CI o recibir un diagnóstico de esquizofrenia) en una población refleja las diferencias genéticas en dicho grupo. Como ejemplo de lo engañosas que pueden llegar a ser las estimaciones de variabilidad, Eric Turkheimer, genetista de la Universidad de Virginia, propone el rasgo humano de tener dos brazos. Prácticamente todas las personas incluidas en un grupo poblacional determinado tendrán dos brazos, y no suele haber diferencias en el número de brazos entre gemelos idénticos (que comparten cerca del 100 por cien de su secuencia de ADN) y los mellizos, de quienes se considera que comparten, de media, el 50 por ciento de los genes. Así pues, al calcular la heredabilidad del número de brazos utilizando las ecuaciones clásicas para la heredabilidad, se obtiene un valor de 0. Y, pese a ello, sabemos que tener dos brazos está determinado casi totalmente por la genética.

Es fundamental comprender qué significa realmente la heredabilidad en la esquizofrenia, opinan los científicos, dado que incluso los estudios genéticos con mayor capacidad solo han identificado cerca de un tercio del componente genético incluido en las predicciones. ¿Aparecerá finalmente, en estudios más sofisticados, la denominada heredabilidad ausente? ¿O resultará que los genes no desempeñan un papel tan importante como el que han vaticinado durante mucho tiempo las estimaciones de heredabilidad? Las deliberaciones siguen en marcha.

nan los factores genéticos y ambientales para desencadenar la esquizofrenia.

Incluso los más acérrimos defensores de la importancia de la genética admiten que las influencias ambientales deben de estar desempeñando cierto papel. «Los genes no son el destino», concede McCarroll. Subraya que cuando un miembro de una pareja de gemelos idénticos recibe un diagnóstico de esquizofrenia, el otro gemelo solo sufre el trastorno en la mitad de los casos (aproximadamente), un claro indicio de que los factores no genéticos deben de ser relevantes.

RAÍCES AMBIENTALES

Las decepciones sufridas en la búsqueda de los genes de la esquizofrenia han obligado a quienes trabajan en este campo a replantearse cómo avanzar. La genética sigue considerándose importante para comprender las bases biológicas de la enfermedad, así como para obtener nuevos fármacos. No obstante, la mayoría de los investigadores y de los médicos concuerdan en que se necesita una estrategia más amplia que complemente las técnicas genómicas, una que se apoye en el conocimiento de los expertos en sociología, psicoterapia e incluso salud prenatal.

A lo largo de los últimos años, psicólogos, psiquiatras, epidemiólogos y trabajadores sociales han ido incrementando el conocimiento sobre los factores ambientales y sociales subyacentes a la enfermedad. Muchos de los nuevos estudios se centran actualmente en la «adversidad durante la infancia», un término general que abarca el abuso sexual, físico y emocional, la negligencia, el acoso escolar y la pérdida de uno o ambos progenitores.

Uno de los más citados de esos estudios, un metanálisis realizado por van Os y su equipo y publicado en el 2012 en *Schizophrenia Bulletin*, combinó los datos de distintas investigaciones para aumentar el poder estadístico de los resultados y detectó que los pacientes con síntomas psicóticos tenían una probabilidad tres veces superior de haber sido víctimas de adversidad, lo que suponía un riesgo mucho mayor que el de cualquiera de los genes identificados hasta el momento mediante GWAS. «Necesitamos centrarnos más en cambiar el entorno para poder prevenir la esquizofrenia», afirma Roar Fosse, neurocientífico de la Fundación del Hospital Vestre Viken, en Noruega. «Es necesario que proporcionemos mejores infancias a los niños, así como mayores opciones de evitar el estrés extremo.»

Y en un artículo publicado en *The Lancet* en 2014, Ehrenreich y su equipo demostraron cómo los estudios que combinan datos genéticos y ambientales aportan nuevas perspectivas. El equipo realizó un análisis basado en 750 varones alemanes con esquizofrenia, para los que, de forma excepcional, se disponía de datos tanto de GWAS como de riesgo ambiental y social. Se fijaron en la edad a la que habían manifestado por primera vez la esquizofrenia, un indicador clave de cómo se desenvolverán los pacientes en el futuro: cuanto menor es la edad de aparición, peor es su evolución a largo plazo. Demostraron que los factores ambientales, entre ellos las lesiones cerebrales a corta edad, los

traumas infantiles, vivir en un entorno urbano, proceder de una familia de inmigrantes y, sobre todo, el consumo de cannabis, se asociaban de forma clara con una manifestación más temprana de la enfermedad. Los pacientes que presentaban cuatro o más factores de riesgo ambiental la padecían diez años antes, en promedio, que quienes no tenían ninguno. En cambio, los denominados índices de riesgo poligénicos, calculados a partir de los datos de GWAS, no mostraban un efecto detectable en la edad de inicio de la esquizofrenia.

Según Ehrenreich, dichos resultados no significan que los genes tengan un papel irrelevante. Es más probable que los factores genéticos varíen tanto de una persona a otra que cada una sufra la enfermedad por algún motivo distinto, afirma. Al mismo tiempo, otros investigadores están analizando de qué forma el estrés ambiental, ya sea en el hogar, en la escuela o a través de la exposición a ciertos productos químicos, puede activar o desactivar los genes, en lo que se conoce como epigenética [*véase* «Un nuevo tipo de herencia», por Michael K. Skinner; Investigación y Ciencia, octubre de 2014].

LA GRAN PREGUNTA ES SI LA BÚSQUEDA DE GENES ACABARÁ PROPORCIONANDO NUEVOS TRATAMIENTOS PARA LA ESQUIZOFRENIA. LA MAYORÍA DE LOS CIENTÍFICOS CREE QUE HARÁN FALTA MUCHOS AÑOS MÁS PARA QUE LA INVESTIGACIÓN DÉ SUS FRUTOS EN FORMA DE NUEVOS FÁRMACOS U OTRAS INTERVENCIONES

Ehrenreich y otros instan a los investigadores de GWAS a incorporar datos ambientales en sus estudios siempre que sea posible, de modo que pueda derivarse un modelo estadístico para explicar cómo interaccionan los genes y el entorno para provocar la enfermedad. «Es una pena que se deje de lado el análisis de la información ambiental en algunos de los estudios genéticos más caros y técnicamente más avanzados», opina Rudolf Uher, investigador psiquiátrico en la Universidad Dalhousie en Nueva Escocia.

Por desgracia, combinar epidemiología y genética puede ser extremadamente complejo. «El coste de recabar datos ambientales es enorme, y existe un notable desacuerdo sobre la forma en que deben definirse las variables ambientales», comenta O'Donovan, de Cardiff. Pese a todo, en 2010 la Unión Europea financió un proyecto piloto de cinco años, dirigido por O'Donovan, van Os y otros, para lograr ese objetivo, y se ha empezado ahora a analizar los datos generados.

La gran pregunta, sin lugar a dudas, es si la búsqueda de genes, incluso teniendo en cuenta la influencia del entorno, acabará dando lugar a nuevos tratamientos. La mayoría de los científicos coinciden en que se necesitarán muchos más años para que tales investigaciones den sus frutos en forma de nuevos fármacos u otras intervenciones. La genética ha proporcionado las primeras pistas biológicas relevantes en la comprensión de la esquizofrenia, afirma Peter Visscher, genetista de la Universidad de Queensland en Brisbane. «Es demasiado pronto para saber si tales descubrimientos proporcionarán nuevas terapias, pero no existe ninguna razón por la que no puedan hacerlo.» John McGrath, investigador psiquiátrico también de Queensland, concuerda con ello: «La investigación es compleja y resulta difícil entender el cerebro. Pero no debemos desesperar y tirar la toalla».

Mientras tanto, de forma paralela a los estudios genéticos, los expertos en esquizofrenia están siguiendo otras líneas de investigación. Han empezado a buscar biomarcadores, esto es, moléculas indicadoras en la sangre o anomalías en neuroimágenes que pudieran ayudar a identificar las personas con un riesgo elevado de sufrir el trastorno. Ello podría dar lugar a un tratamiento precoz, algo que, según numerosos estudios, puede conllevar un mejor pronóstico a largo plazo. Otros equipos, basándose en las pruebas que apuntan a la mayor vulnerabilidad de los hijos de mujeres que han padecido enfermedades infecciosas durante el embarazo (posiblemente como consecuencia de respuestas inmunitarias perjudiciales para el cerebro del feto), están analizando compuestos antiinflamatorios para determinar si es posible reducir los síntomas.

Varios ensayos clínicos recientes, mientras tanto, parecen señalar que las terapias psicosociales, en especial la cognitivo-conductual, contribuyen a reducir los síntomas y el sufrimiento de los pacientes. Aunque tales investigaciones no están exentas de polémica y los efectos hasta el momento solo han sido moderados, los partidarios de esas estrategias están ganando terreno tanto en EE.UU. como en Europa. En el Reino Unido, por ejemplo, las autoridades sanitarias recomiendan la terapia cognitivo-conductual en todos los casos en que aparezca un primer episodio de psicosis. «Debe abordarse y corregirse el desequilibrio entre la financiación de la investigación genética y farmacológica y la psicosocial», apunta Brian Koehler, neurocientífico de la Universidad de Nueva York que también trata a personas con esquizofrenia en su consulta privada.

Debido a los intrincados mecanismos que intervienen en la esquizofrenia, la idea de un tratamiento integral sigue siendo especulativa. Se alberga la esperanza de que algún día las neuroimágenes u otras pruebas diagnósticas ayudarán a identificar, antes de la adolescencia o durante ella, los jóvenes con un elevado riesgo de sufrirla. En tal caso, los nuevos medicamentos y la asistencia psicológica podrían retrasar o prevenir un primer brote psicótico. Para lograrlo, los biólogos y los sociólogos deben continuar sumando su experiencia para obtener una imagen conjunta de una de las enfermedades psiquiátricas más complejas. IyC

PARA SABER MÁS

The environment and schizophrenia. Jim van Os et al. en *Nature*, vol. 468, págs. 203-212, noviembre de 2010.
Rethinking schizophrenia. Thomas R. Insel en *Nature*, vol. 468, págs. 187-193, noviembre de 2010.
Talking back to madness. Michael Balter en *Science*, vol. 343, págs. 1190-1193, marzo de 2014.
Schizophrenia. René S. Kahn et al. en *Nature Reviews Disease Primers*, vol. 1, art. 15.067, 2015.
Schizophrenia risk from complex variation of complement component 4. Aswin Sekar et al. en *Nature*, vol. 530, págs. 177-183, febrero de 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

Bases moleculares de la esquizofrenia. Daniel C. Javitt y Joseph T. Coyle en *IyC*, marzo de 2004.

por Julio Parapar, María Candás y Xela Cunha-Veira

Si eres investigador en el campo de las ciencias de la vida y la naturaleza, y tienes buenas fotografías que ilustren algún fenómeno de interés, te invitamos a participar en esta sección. Más información en **www.investigacionyciencia.es/decerca**

Disección de poliquetos sin bisturí

La microtomografía revela la anatomía interna de estos invertebrados marinos y contribuye a su estudio taxonómico y sistemático

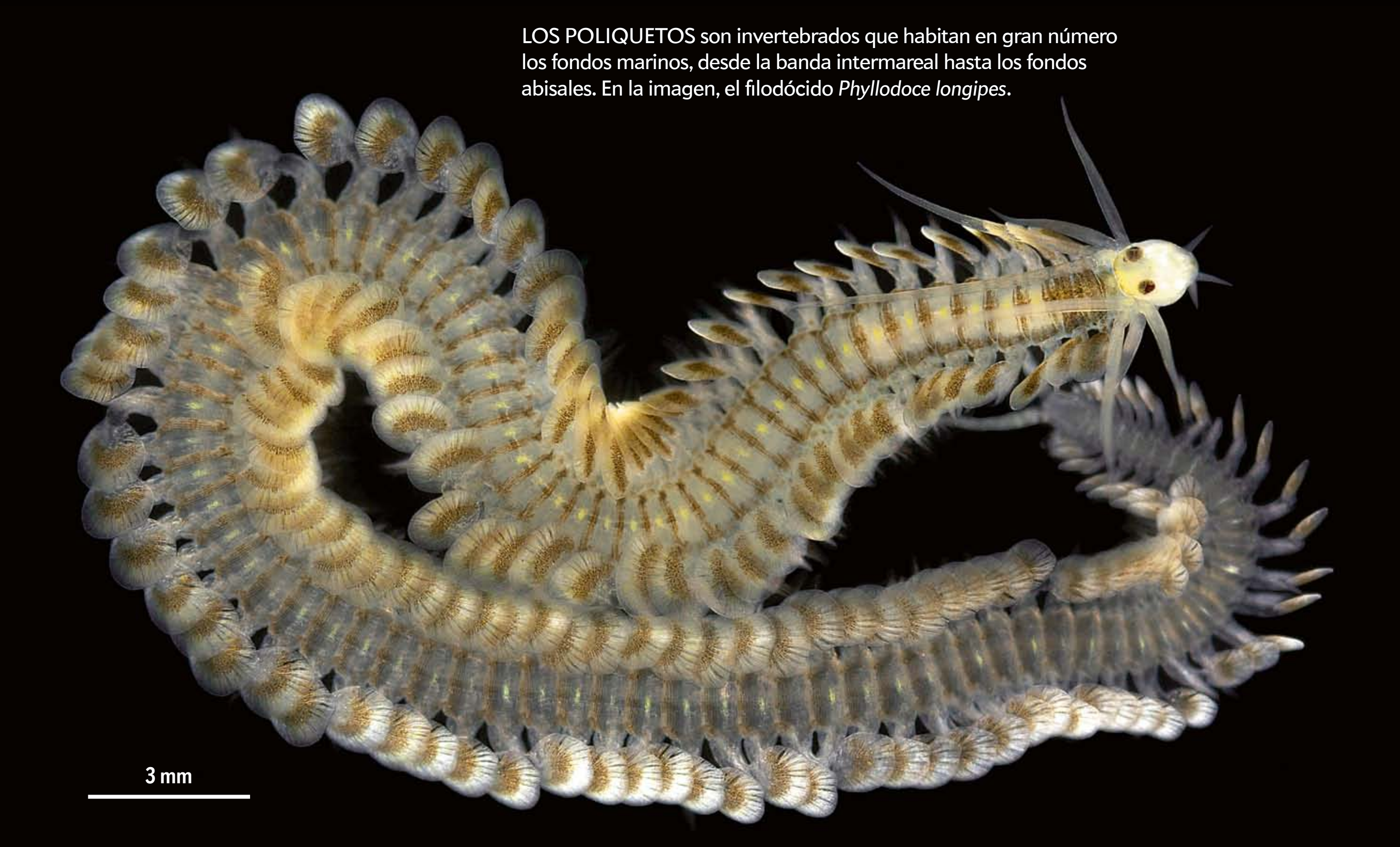
La novedosa técnica de la microtomografía computarizada representa una revolución en el estudio anatómico de los animales. Al ser poco o nada invasiva, permite examinar el interior del organismo sin necesidad de destruirlo [*véase* «Microtomografías de invertebrados», por Javier Alba-Tercedor; Investigación y Ciencia, mayo de 2014]. En los estudios de taxonomía y sistemática constituye un avance notable, pues facilita la búsqueda rápida y sencilla de nuevos caracteres internos que puedan aportar información relevante para mejorar el conocimiento de las relaciones filogenéticas entre clados.

La Estación de Biología Marina de La Graña, de la Universidad de Santiago de Compostela, es uno de los pocos centros en España que dispone de esta novedosa herramienta. Nuestro equipo del Departamento de Biología Animal de la Universidad de La Coruña, en estrecha colaboración con la estación, ha empleado esta técnica para investigar y describir un buen número de grupos de invertebrados, entre ellos moluscos, crustáceos peracáridos, anélidos y equinodermos.

Gran parte de nuestro trabajo se enmarca en el proyecto Fauna Ibérica, una iniciativa dirigida por el Museo Nacional de Ciencias Naturales, del CSIC, que tiene como finalidad mejorar el conocimiento de la biodiversidad animal en el ámbito íbero-balear. Los esfuerzos se centran en el estudio taxonómico de las especies, así como en su distribución para, entre otras cosas, estimar los enclaves más necesitados de protección.

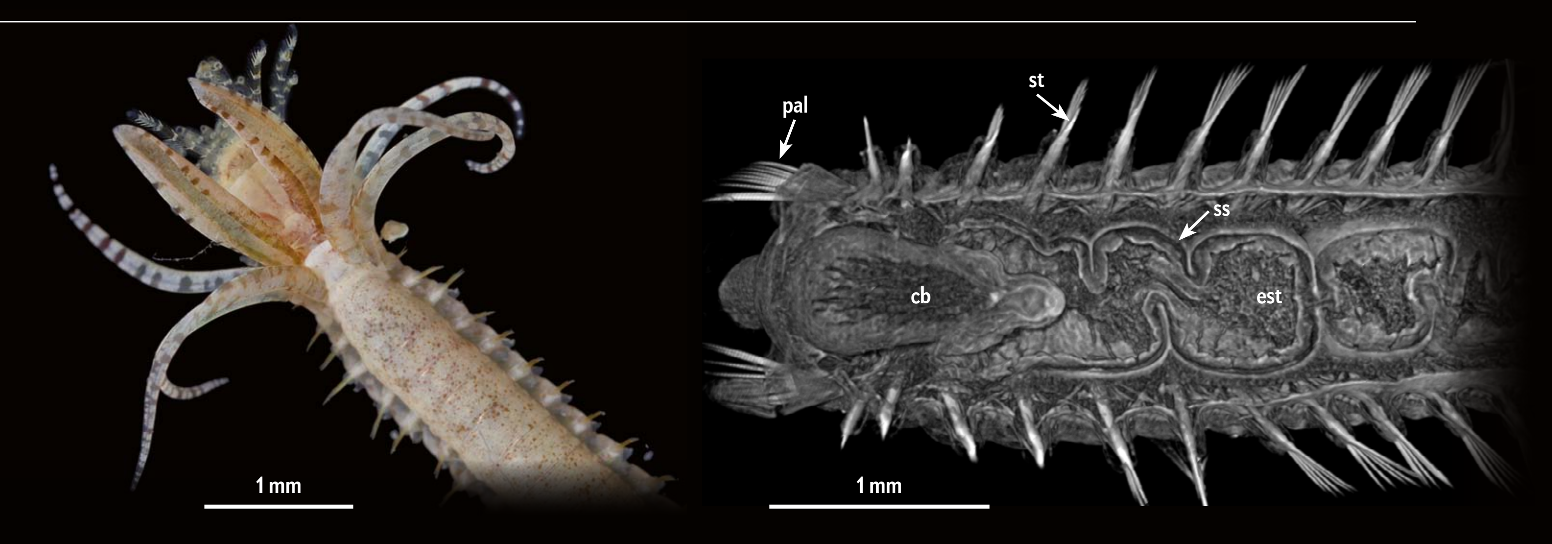
Nuestro trabajo con los anélidos poliquetos ibéricos ha representado una de las líneas de investigación más activas del proyecto, con cuatro volúmenes ya publicados y un quinto en fase avanzada de redacción. Las imágenes ilustran algunos resultados obtenidos con tres especies pertenecientes a los géneros *Phyllodoce*, *Euclymene* y *Ampharete*. En ellas se muestran distintas secciones corporales de la región anterior, en las que se aprecian tanto la forma como la posición espacial de diferentes órganos internos relacionados fundamentalmente con los sistemas muscular, digestivo, circulatorio y nervioso.

—Julio Parapar
Universidad de La Coruña
—María Candás y Xela Cunha-Veira
Estación de Biología Marina de La Graña
Universidad de Santiago de Compostela

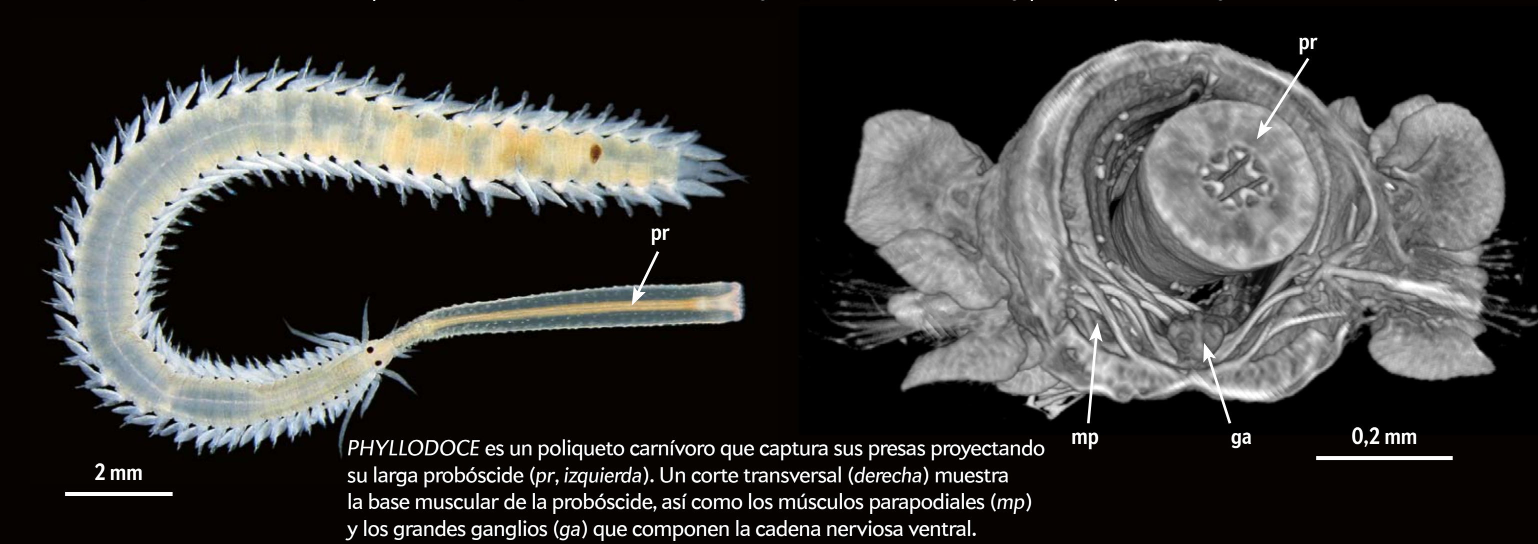


LOS POLIQUETOS son invertebrados que habitan en gran número los fondos marinos, desde la banda intermareal hasta los fondos abisales. En la imagen, el filodócido *Phyllodoce longipes*.

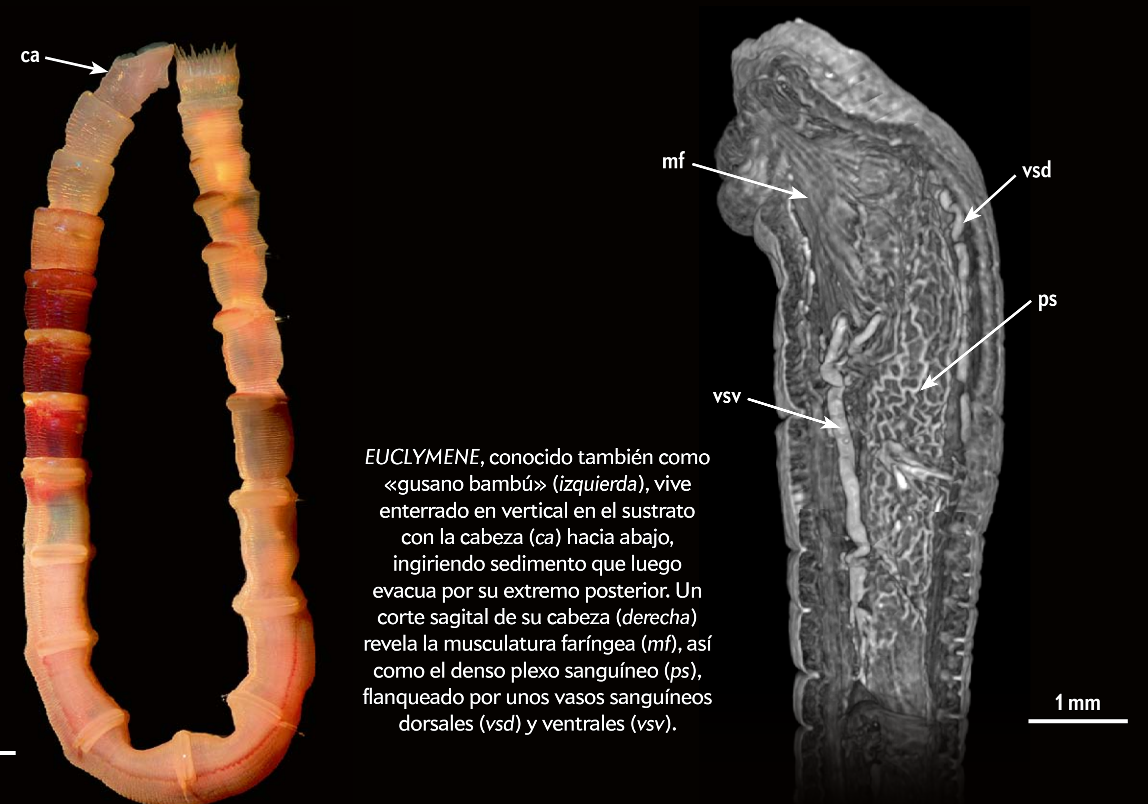
FOTOS CORTESÍA DE ARNE NYGREN, UNIVERSIDAD DE GOTEMBURGO (*Phyllodoce longipes*); GREG ROUSE, INSTITUTO SCRIPPS DE OCEANOGRAFÍA (*Euclymene* y *Phyllodoce*, *derecha*); ALEXANDER SEMENOV, ESTACIÓN BIOLÓGICA DEL MAR BLANCO, RUSIA (*Ampharete*); JULIO PARAPAR, MARÍA CANDÁS Y XELA CUNHA-VEIRA (*todas las microtomografías*). ESTUDIO FINANCIADO POR EL MINISTERIO DE ECONOMÍA, INDUSTRIA Y COMPETITIVIDAD A TRAVÉS DEL PROYECTO FAUNA IBÉRICA



AMPHARETE es un poliqueto muy común en la comunidad bentónica (*izquierda*). En un corte frontal obtenido mediante microtomografía (*derecha*) se observa la cavidad bucal (*cb*) (donde aloja los tentáculos que proyecta al exterior para atrapar partículas orgánicas), seguida de un amplio estómago (*est*), rodeado a su vez por un seno sanguíneo (*ss*). Las numerosas y largas sedas torácicas (*st*) y paleales (*pal*) son muy evidentes.



PHYLLODOCE es un poliqueto carnívoro que captura sus presas proyectando su larga probóscide (*pr*, *izquierda*). Un corte transversal (*derecha*) muestra la base muscular de la probóscide, así como los músculos parapodiales (*mp*) y los grandes ganglios (*ga*) que componen la cadena nerviosa ventral.



EUCLYMENE, conocido también como «gusano bambú» (*izquierda*), vive enterrado en vertical en el sustrato con la cabeza (*ca*) hacia abajo, ingiriendo sedimento que luego evacua por su extremo posterior. Un corte sagital de su cabeza (*derecha*) revela la musculatura faríngea (*mf*), así como el denso plexo sanguíneo (*ps*), flanqueado por unos vasos sanguíneos dorsales (*vsd*) y ventrales (*vsv*).

por José Sanmartín Esplugues

José Sanmartín Esplugues es catedrático de filosofía de la ciencia en la Universidad Católica de Valencia San Vicente Mártir.



La técnica y el proceso de humanización

En diálogo con José Ortega y Gasset

En 1933, la Universidad Internacional Menéndez Pelayo se inauguró con un curso dictado por Ortega sobre la técnica. En su introducción afirmó rotundamente: «Señores: sin la técnica el hombre no existiría ni habría existido nunca».

En 1939 se publicó este curso en un librito titulado *Ensimismamiento y alteración*, que llevaba por subtítulo *Meditación de la técnica*. Creo que esta denominación refleja muy bien la primera matización —perdón por la osadía— que me gustaría hacer a la aserción de Ortega. Quizás hubiera sido más exacto decir: «Señores: sin ensimismamiento, no habría cultura. Sin cultura, no habría técnica y, sin técnica, no habría ser humano».

Max Scheler había aseverado en *El puesto del hombre en el cosmos* (1928) que, a diferencia del resto de los animales, los humanos no somos entes extáticos, siempre volcados hacia fuera para responder a estímulos relacionados con la satisfacción de nuestras necesidades básicas. El hombre tiene el don de suspender sus reacciones ante estímulos externos: es capaz de meterse en sí mismo, de ensimismarse. Y es en esos momentos de aislamiento interior cuando, en lugar de enfrentarse de manera automática a lo externo, se plantea conscientemente los porqués de todo ello y busca cómo evitar su estado de sumisión a lo que el mundo le impone.

Ese don convierte al humano en un ser especial, sin que eso signifique que sea el único dotado de tal facultad. Sabemos de otros animales que la tienen, pero su capacidad de ensimismarse y la nuestra muestran efectos inconmensurables. En nuestro caso, ha llegado a ser nada menos que la habilidad que permite dar forma a cualquiera de nuestras actividades. Y esa forma no es otra cosa que la cultura, que, así entendida, se constituye en una categoría del ser.

Entre las actividades humanas las hay que posibilitan incidir sobre el mundo —sobre «la circunstancia», dirá Ortega—, tratando de erradicar cuanto nos es hostil y nos hace seres necesitados. Esa erradicación es el resultado de producir o fabricar lo que no hay en la naturaleza, bien porque, simplemente, no existe en ella, bien porque no está a nuestra disposición cuando lo precisamos. A ese conjunto de actos es a lo que se denomina «técnica».

La técnica nos permite, en suma, vencer la resistencia que la naturaleza nos presenta a la hora de insertarnos en ella. Es la vía que hemos desarrollado a fin de que los requisitos imprescindibles para nuestra supervivencia como animales dejen de serlo. Para conseguirlo, reobramos la naturaleza, creando sobre ella una malla técnica a la que nos vamos adaptando a la vez que nos liberamos de los dictados naturales.

Esa adaptación a la malla técnica aparece así, en primer lugar, como la salvación del ser humano, que, desde un punto de vista biológico —y es esta una idea compartida por los filósofos de cuño fenomenológico o existencialista del siglo pasado que sigue hoy contando con una amplia aceptación—, es un callejón sin salida: un animal enfermo. La técnica no solo le ha abierto la puerta hacia la supervivencia. Ha hecho mucho más. Liberándole de las necesidades básicas, le ha permitido vacar hacia lo que, realmente, considera necesario y que, desde el punto de vista biológico, puede verse como superfluo. Nuestra Arcadia no es, pues, un mundo natural en el cual vivimos felizmente porque estamos perfectamente adaptados a él. Es el mundo artificial que nos hemos construido, en el cual las cuestiones que verdaderamente nos importan en poco o en nada tienen en consideración nuestra biología. Esta, obviamente, sigue existiendo, pero rodeada de múltiples capas de cultura que, incluso, han llegado a redefinir sus funciones. Tómense como ejemplos la sexualidad o la alimentación.

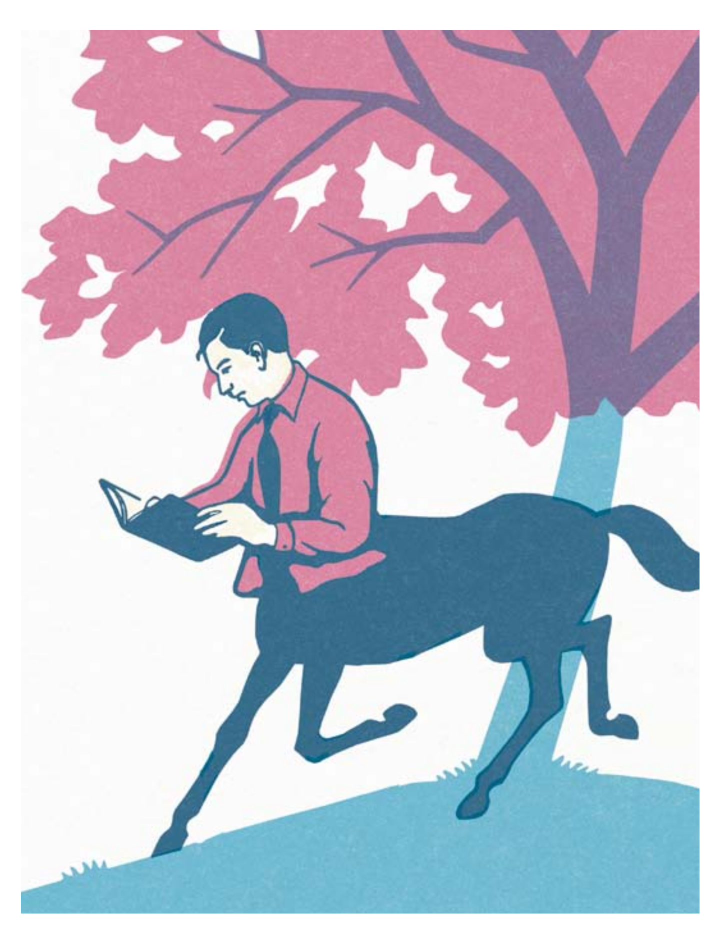
Lo dicho se resume así: el ser humano, valiéndose de la cultura y, en concreto, de la técnica, no solo se garantiza estar, sino estar bien. Porque para él, bienestar significa estar liberado de los dictados de la naturaleza para poder satisfacer lo que realmente considera necesario: vivir bien. Ese es el término *ad quem* de la reforma de la naturaleza, y la vida humana puede entenderse, entonces, como el camino que hay que hacer para llegar a tal término. La vida humana es, en ese sentido, un que-hacer, un proyecto presidido por un objetivo (el bienestar), cuyo logro pleno, en palabras de Ortega, constituye la felicidad.

Me parece que tildar al ser humano de callejón biológico sin salida es una mera hipérbole filosófica que nos prepara para aceptar la necesidad de que algo ha venido en nuestra salvación y que ese algo ha sido la técnica.

Ortega asevera que el hombre no tiene naturaleza, sino historia. Pero, obviamente, si redujésemos nuestra naturaleza a (prácticamente) nada, la consecuencia perogrullesca que obtendríamos sería clara: no tendríamos nada que hacer frente a la naturaleza, pues, incluso comparados con el más humilde de los otros animales, estaríamos desprovistos de los mecanismos innatos que permiten sobrevivir. Lo bien cierto es que el mismo Ortega se contradice al sostener que no todo en la naturaleza son dificultades para el ser humano. Porque «si no encontrase facilidad alguna, estar en el mundo le sería imposible». «Facilidad» significa aquí que el ser del hombre y la naturaleza, al menos parcialmente, coinciden. O, dicho de otro modo, que en el ser humano hay una parte natural y otra extranatural o cultural. Por eso el mismo Ortega lo define de forma bellamente simbólica como «un centauro ontológico».

Lo quiera Ortega o no, el ser humano tiene, pues, naturaleza, aunque estemos de

acuerdo con él en que la parte extranatural ha sepultado la parte natural bajo innumerables capas de artificios. Pero no debería olvidarse de que, bajo esas capas, hay un conjunto de rasgos que nos posibilitan el ensimismamiento y otras capacidades que hacen de nosotros seres biológicamente muy peculiares. En concreto, por naturaleza somos seres-para-la-vinculación-con-otros. Nuestro cerebro nos abre de forma inconsciente a la captación del otro y de sus estados psíquicos. El rostro del otro, sus gestos, posturas y actitudes lo convierten automáticamente en mi complemento. Yo no soy un individuo que aprenda a relacionarse con otros individuos: mi yo es siempre un nosotros, con independencia de mi voluntad o inteligencia, que potenciarán o tratarán de reprimir mis inclinaciones innatas.



Las sociedades humanas que han potenciado las relaciones automáticas de vinculación no han necesitado re-obrar la naturaleza por haberla percibido o sentido como hostil. Han generado tupidas redes de organización que les han permitido vivir bien sin intervenir drásticamente en los procesos naturales. En cambio, las sociedades que han reprimido las inclinaciones naturales de vinculación, que las han llegado en casos extremos a considerar incluso como muestras de debilidad y que han hecho prevalecer el yo y los intereses particulares sobre el nosotros y el bien común, han estado presididas por el afán de poder y, muy en concreto, de dominio sobre una naturaleza hostil, a la que había que subordinar técnicamente.

Las ideas dominantes en la cultura occidental, al menos desde el siglo xvi, apuntan en la segunda dirección. ¿Y qué podría justificar mejor sus pretensiones que la imagen de un hombre que, si no hubiera sido por la re-obra de la naturaleza, muy probablemente se hubiera extinguido?

Pues bien, si la técnica es el factor clave no solo de nuestra supervivencia, sino también de nuestro bienestar, ¿habría que ponerle límites en su reforma de la naturaleza? En principio, la capacidad técnica parece de por sí ilimitada. Por eso, parafraseando a Ortega, ser técnico —como lo es el ser humano— es poder serlo todo. Y, obviamente, si el ser humano como ser técnico puede serlo todo, puede decidir incluso dejar de ser humano. Y en esas estamos en este momento.

Las puertas se abren a la imaginación. Junto a la producción de artefactos basados en materiales naturales, hemos aprendido a sintetizar lo que hay y también lo que, en sentido estricto, no hay en la naturaleza. Incluso hemos actuado así con los seres vivos. La cuestión es entonces: ¿por qué no aprovechar lo mejor de cada especie para sintetizar seres vivos que nos resulten multifuncionales? Y, yendo más lejos, si nosotros, los seres humanos, somos poco más que una calamidad desde un punto de vista biológico, si —pese a nuestros desarrollos técnicos— no hemos logrado todavía liberarnos de una naturaleza que nos sigue siendo hostil, entonces: ¿por qué no nos dejamos de falsos escrúpulos y, en lugar de añadirnos prótesis, comenzamos a construirnos desde cero según un diseño preestablecido? Llevados por ensueños que huelen a Nietzsche, hay entonces quienes no solo ven al ser humano como un ser enfermo, sino como un ser condenado a un destino cruel: la muerte, la desaparición, la disolución en la nada. ¿Por qué no diseñarnos, entonces, como seres eternos o, siendo más humildes, como seres perdurables? Quienes dicen que sí a estos interrogantes —«hagámoslo»— son los llamados «posthumanistas», porque el objetivo de sus pretensiones ya no es la mejora del ser humano, sino su superación.

A estos delirios puede llevarnos una percepción hostil de la naturaleza, unida por una parte a una concepción del ser humano como un ser enfermo cuya vida es un proyecto técnicamente vertebrado y, por otra, a una defensa de la autonomía de la técnica y al primado del imperativo técnico (cuanto técnicamente pueda hacerse, hágase).

Evidentemente, la técnica nos está sirviendo para vivir mejor. Hemos de mejorar; de acuerdo. Pero, si en algo hemos de hacerlo es ante todo en nuestra sensatez y prudencia, adoptando las medidas adecuadas para que, antes de aplicarla, la técnica sea objeto de reflexión acerca de lo que esperamos conseguir con ella para el bien humano integral. Solo así se garantizará una cultura al servicio de la dignidad humana. IyC

PARA SABER MÁS

Ensimismamiento y alteración. José Ortega y Gasset. Espasa-Calpe, 1939.
Human nature and the limits of science. John Dupré. Oxford University Press, 2002.
Nuevas perspectivas en el debate sobre la naturaleza humana. Alfredo Marcos en *Pensamiento*, vol. 71, n.º 269, 2015.
Transhumanismo. Antonio Diéguez. Herder, 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

La extraña relación entre filosofía y tecnología. Ana Cuevas en *IyC*, noviembre de 2015.
Transhumanismo: entre el mejoramiento y la aniquilación. Antonio Diéguez en *IyC*, noviembre de 2016.

por Fernando Peláez



Fernando Peláez es director del Programa de Biotecnología en el Centro Nacional de Investigaciones Oncológicas. Trabajó veinte años en el Centro de Investigación Básica de la empresa farmacéutica MSD de España, del cual fue director entre 1998 y 2008.

Retos en el desarrollo de fármacos

¿Por qué la mayoría de los medicamentos experimentales suspenden los ensayos clínicos por falta de eficacia?

Es un hecho incontrovertible que lanzar nuevos fármacos al mercado conlleva cada vez más costes, dificultades y tiempo (una media de quince años). Una de las razones de ello es que las nuevas sustancias pretenden tratar enfermedades con causas complejas o no del todo entendidas (como el alzhéimer). Además, muchas veces los modelos preclínicos (los estudios previos a los ensayos con humanos) no son suficientemente predictivos. A ello hay que añadir la existencia en el mercado de otros productos con las mismas indicaciones y las mayores exigencias de las agencias reguladoras con respecto a la seguridad —algunos medicamentos comercializados desde hace décadas tendrían muy complicada su aprobación si se les aplicaran los criterios actuales.

La búsqueda de un fármaco necesita dos elementos básicos. Por un lado, el hallazgo de una diana farmacológica válida, es decir, algún componente de la maquinaria celular con la que interaccione el futuro agente terapéutico, de modo que este produzca su efecto. Por otro, la nueva molécula debe mostrar ciertas propiedades como fármaco. Debe presentar una farmacocinética aceptable, es decir, que cuando se administre se mantenga en unos niveles plasmáticos a los que pueda ejercer su acción durante un tiempo suficiente con una dosificación razonable (no tendría sentido un medicamento que hubiera que administrar cada 30 minutos). Igualmente, no debe producir efectos secundarios tóxicos o, si los produce, deben ser mínimos y manejables.

La investigación farmacológica se basa en el método de prueba y error: a partir de una molécula inicial que muestra solo en parte las propiedades buscadas, se van haciendo modificaciones químicas que van mejorando su comportamiento hasta conseguir el fármaco candidato, o experimental. Este tendrá que demostrar su eficacia en modelos animales de la enfermedad, así como un perfil toxicológico aceptable, antes de ser ensayado en humanos, en quienes deberá también verificarse su eficacia y seguridad.

Generar un fármaco experimental cuando se ha identificado una diana terapéutica suele ser factible, aunque el tiempo invertido en ello sea largo. De hecho, la industria farmacéutica ha aumentado la eficiencia de esta parte del proceso en las últimas décadas, pero curiosamente ello no ha mejorado de forma sustancial la comercialización de nuevos productos. Apenas un diez por ciento de los fármacos experimentales que se someten a ensayos clínicos llegan a ser aprobados; el resto son rechazados por falta de eficacia o, menos veces, por problemas de seguridad.



Cuando hablamos de falta de eficacia, el problema no es del fármaco en sí, sino del mecanismo de acción elegido, que, simplemente, no sirve. ¿Por qué son tan difíciles de identificar las dianas farmacológicas? En esencia, por nuestras limitaciones a la hora de entender la biología que subyace en los procesos fisiopatológicos, y por los complicados entramados e interacciones moleculares que tienen lugar entre células, tejidos y órganos, que siempre terminan sorprendiéndonos.

¿Cuáles son las posibles soluciones? En primer lugar, se necesita una apuesta más fuerte por la investigación básica en biomedicina. Comprender mejor el funcionamiento de los sistemas biológicos permite aumentar las posibilidades de descubrir dianas válidas, así como predecir posibles efectos adversos. La historia está llena de ejemplos de medicamentos que no funcionaron o que generaron graves problemas de seguridad simplemente por una falta de comprensión de la biología subyacente al modo de acción.

En segundo lugar, debe disponerse de mejores modelos preclínicos (no necesariamente animales), más predictivos. Con demasiada frecuencia las evidencias previas de la eficacia de las moléculas que se someten a ensayos clínicos son limitadas. A veces, se sigue apostando por esas moléculas confiando en que los ensayos clínicos darán mejores resultados, algo que no suele suceder. Si se tiene en cuenta que la fase más costosa del desarrollo de fármacos es la última, los ensayos clínicos, es esencial refinar las fases preclínicas para intentar llegar hasta ellos con las máximas garantías de éxito.

También puede mejorarse la eficiencia en tiempo, coste y resultados del ensayo clínico. Uno de los objetivos de la moderna medicina personalizada es conseguir una mejor estratificación de los pacientes. Esto es, a partir de datos derivados de la genómica y de otro tipo, seleccionar grupos de enfermos que tengan una mayor probabilidad de responder al fármaco experimental. Ello reduciría el número de pacientes necesarios para demostrar la eficacia y evitaría su administración a aquellos que muy probablemente no van a responder.

En conclusión, las dificultades en el descubrimiento y el desarrollo de fármacos son sin duda muchas y complejas. Superar estos retos mediante la apuesta por la investigación, con la colaboración público-privada, y la constante revisión y optimización de todas las etapas del proceso es clave para garantizar la capacidad de proporcionar las nuevas generaciones de medicamentos que la sociedad demanda.

por Pere Castells



Pere Castells, experto en ciencia y cocina, es colaborador del proyecto Gastrocultura Mediterránea.

La soja

Infinidad de productos derivados para la cocina

La especie humana viene consumiendo soja desde hace más de 5000 años. Su elevado contenido proteico y un porcentaje considerable de fibras y lípidos hacen que sea un alimento muy nutritivo. Pero la humanidad no solo ha utilizado la soja en su forma nativa, tal y como la ofrece la naturaleza, sino que ha explorado una amplia variedad de productos derivados.

Empecemos por los que se obtienen a partir del fruto fresco. Tenemos los germinados (brotes de soja), con los cuales se elaboran ensaladas, tempuras, salteados y woks. Y la vaina de soja fresca cocida (*edamame*), muy empleada en Japón, que suele consumirse como aperitivo en frío.

A estos les sigue la harina de soja, que se obtiene mediante la trituración de las habas. Con ella se elaboran pastas, masas, panes e incluso soja texturizada, un ingrediente con aspecto parecido a los cereales del desayuno y que ya es una referencia en la cocina vegetariana y vegana; se puede hidratar, cocer, dorar e incluso transformar en hamburguesa.

También los productos de extracción tienen interés gastronómico. Con el derivado graso de la soja se elabora un aceite que se utiliza para freír y también como aderezo. De las semillas se obtiene la lecitina, que se emplea como condimento y texturizante, sobre todo en espumas de tipo aire.

Otro gran grupo de productos corresponde a las elaboraciones a base del haba. Destaca la bebida de soja —mal llamada «leche» de soja—, que ha entrado con fuerza en el panorama gastronómico occidental y se emplea para preparar batidos, cremas, flanes e incluso helados. También puede encontrarse deshidratada para utilizar en polvo. A partir de esta bebida se elabora la *yuba* (conocida como piel o nata de soja). Muy apreciada en Japón y China, corresponde a la lámina formada por una mezcla de proteínas y grasas que se obtiene al cocer el líquido. Una vez seca, se utiliza para enrollar piezas de *sushi*, estofados vegetales o como envoltorio para rollitos.

La elaboración más importante a base de bebida de soja es el tofu, que ha proliferado como sustituto del queso láctico. Se prepara mediante la coagulación de las proteínas de la soja, presenta una textura similar a la del queso y porcentajes de grasa muy inferiores. Se utiliza en infinidad de recetas con pasta y para elaborar sopas, hamburguesas, croquetas y albóndigas. También es muy consumido el tofu frito (*agedashidofu*), previamente enharinado con algún tipo de almidón; se añade a sopas, guisos y ensaladas. Y no podemos olvidar el popular tofu deshidratado (*koya dofu*) o, en su máxima calidad, liofilizado. Su larga conservación y rápida aplicación en sopas y guisos lo hace adecuado para las despensas.

Pero quizá los productos que más asociamos a la soja son los fermentados. A este grupo pertenecen las salsas. La primera que se introdujo en occidente fue el *sohyu*, que se obtiene al fermentar soja con trigo tostado, agua y sal. El *tamari* es la salsa de soja pura, fermentada solo con agua y sal; tiene un sabor más intenso y una textura más espesa que el *sohyu*, y es apta para celíacos.

Otro de los fermentados más consumidos es el *natto*. Se obtiene de la fermentación de la soja con la bacteria *Bacillus subtilis natto*. (Se puede preparar en casa con semillas de soja, agua, sal y semillas fermentadas que contengan la bacteria mencionada.) La manera más habitual de consumirlo en Japón es directamente encima de elaboraciones como el arroz.

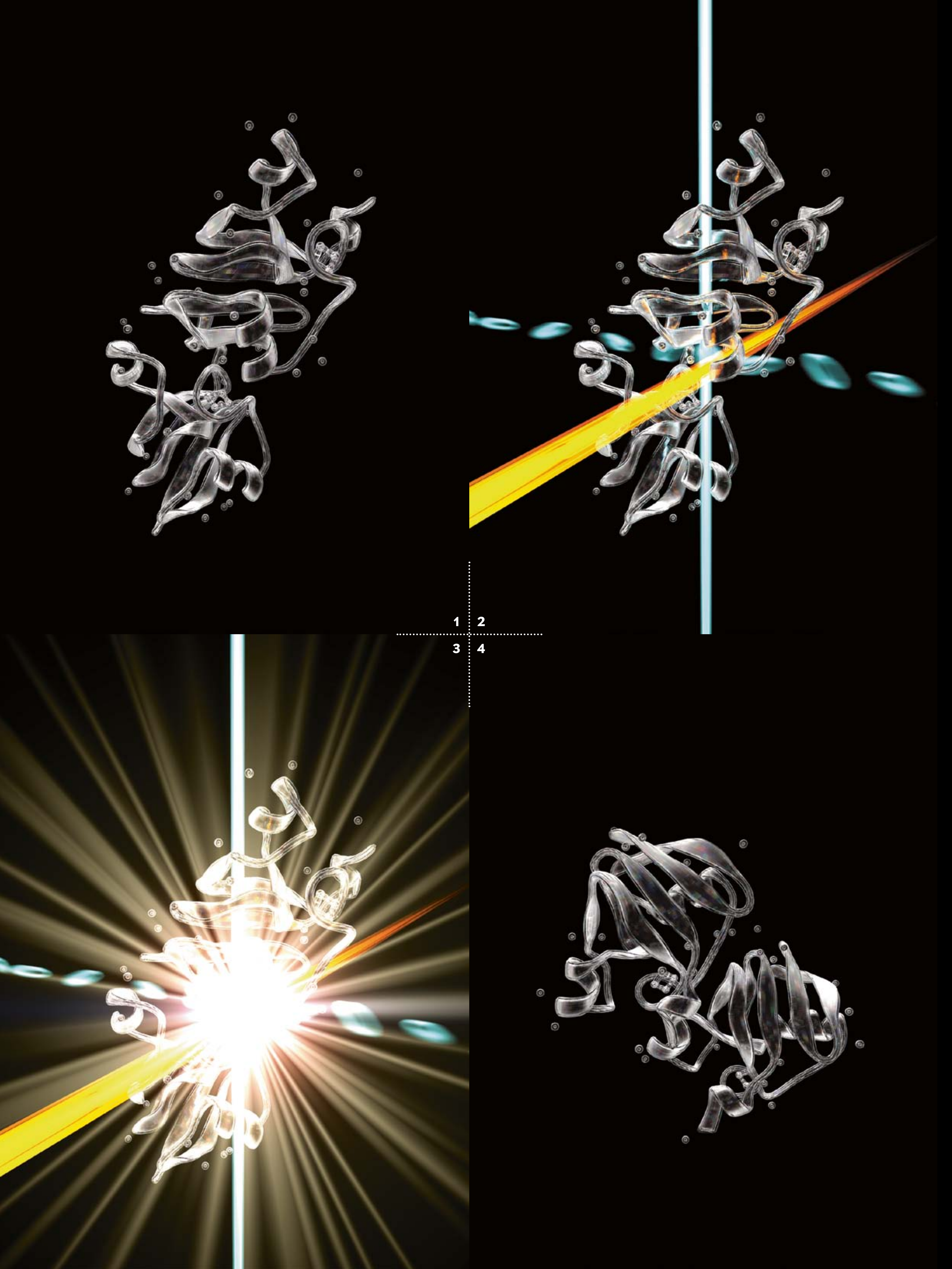
También pertenece a los fermentados el *tempeh*. Por su elevado contenido proteico, se le considera un sustituto cárnico para vegetarianos. En su obtención participa el hongo *Rhizopus oligosporus*.

Contamos también con la pasta *miso*, que se obtiene mediante la fermentación de la soja con hongos de la familia *Aspergillus*. Es un ingrediente básico en sopas, vinagretas, cremas y salsas. La *sopa miso* es un complemento muy extendido en la cocina asiática; se toma como entrante e incluso en el desayuno.

En cuanto a los efectos de la soja en la salud, se ha observado que las mujeres asiáticas que consumen soja tienen la menopausia a una edad más avanzada y sufren menos efectos secundarios de la misma que las europeas; además, sus problemas de osteoporosis son menores. Sin embargo, estas conclusiones no pueden extrapolarse a la población europea.

En MedlinePlus, un portal sobre salud de la Biblioteca Nacional de Medicina de Estados Unidos, podemos leer que, según numerosos estudios científicos, la soja reduce los niveles de colesterol. La Agencia Federal de Fármacos y Alimentos (FDA) de EE.UU. indica que 25 gramos de proteína de soja al día pueden reducir el riesgo de enfermedades cardiovasculares. Además, las isoflavonas que contienen los derivados de la soja pueden prevenir ciertos cánceres. Los elaborados (como el tofu o la bebida de soja) son preferibles a los productos aislados como las proteínas de soja. Con todo, la comunidad científica pide más investigaciones que arrojen luz sobre los efectos de esta legumbre.

Mientras la ciencia trata de ahondar en esa cuestión nutricional, la industria de los derivados de la soja aumenta sin parar en todo el mundo. La demanda de productos para vegetarianos y veganos está creciendo exponencialmente y las previsiones auguran que este progreso seguirá en el futuro.


1
2
3
4

QUÍMICA

FILMAR EL MOVIMIENTO DE LAS MOLÉCULAS

Ya es posible componer «películas moleculares» con fotogramas tomados en milésimas de billonésima de segundo. La técnica promete revelar los secretos de numerosas reacciones bioquímicas

Petra Fromme y John C. H. Spence

EN SÍNTESIS

La función biológica de las proteínas no puede desligarse de su flexibilidad y constantes movimientos. Sin embargo, **estos se desarrollan en escalas demasiado pequeñas y rápidas para verlos con un microscopio ordinario.**

Gracias a pulsos láser de rayos X que apenas duran milésimas de billonésima de segundo, se han creado «películas moleculares» capaces de revelar los cambios que experimentan las proteínas al interaccionar.

La técnica, conocida como cristalografía en serie a escala de femtosegundos, está permitiendo entender procesos antes insondables, como los mecanismos de la fotosíntesis o la manera en que los fármacos se acoplan a sus dianas proteicas.



Petra Fromme ocupa la cátedra Paul A. Galvin de la Universidad Estatal de Arizona, donde dirige el Centro de Descubrimiento Estructural Aplicado.

John C. H. Spence ocupa la cátedra Richard Snell de física de la Universidad Estatal de Arizona y es director científico del Centro de Ciencia y Tecnología BioXFEL, con sede en Búfalo.

EN UN LABORATORIO SUBTERRÁNEO SITUADO BAJO LAS COLINAS DE PALO ALTO, EN CALIFORNIA, LOS CIENTÍFICOS ULTIMABAN

los preparativos para llevar a cabo una serie de explosiones. Su plan era hacer estallar diminutos cristales de proteínas para revelar uno de los secretos mejor guardados de la naturaleza: los procesos mediante los cuales la fotosíntesis convierte la luz en energía química. El eventual premio: un paso hacia una energía limpia e ilimitada.

Era diciembre de 2009, y un equipo de investigadores y estudiantes faltos de sueño llevaba trabajando varios días con el láser de rayos X más potente del mundo, la Fuente de Luz Coherente del Acelerador Lineal de Stanford (LCLS), capaz de acelerar electrones hasta casi la velocidad de la luz. Un grupo ajustaba los inyectores que lanzarían los cristales de proteínas hacia el haz de rayos X. Otro cargaba el inyector con nuevos cristales de un complejo proteico clave en la fotosíntesis, el fotosistema I.

Al final de los más de tres kilómetros del túnel del acelerador, los cristales emprendían su marcha hacia la intensa luz del láser. Pero, antes de que explotasen, cada uno era «fotografiado» con una nueva técnica que promete revolucionar nuestro conocimiento de la biología a las escalas más pequeñas. Gracias a ella, hoy podemos ensamblar rápidas secuencias de imágenes, tomadas en intervalos de femtosegundos (milésimas de billonésimas de segundo), para convertirlas en una película.

Richard Feynman dijo en una ocasión que «todo lo que hacen los seres vivos puede entenderse a partir de las sacudidas y los contoneos de los átomos». Pero nunca antes habíamos podido ver directamente cómo se mueven los átomos y las moléculas dentro de los seres vivos a esa velocidad. Nuestro método, la cristalografía en serie a escalas de femtosegundos (SFX), nos permite observar las danzas moleculares que determinan cómo afecta un fármaco a las células o cómo se transforma la energía en las reacciones químicas.

Varios equipos de investigación en distintas partes del mundo se han valido de la SFX para descubrir detalles muy finos sobre los mecanismos por los que un medicamento experimental regula la presión sanguínea, desbrozando el camino hacia mejores tratamientos contra la hipertensión. Esta técnica también ha revelado la estructura de la enzima que destruye los glóbulos rojos en la enfermedad del sueño, una dolencia letal causada por parásitos. Y ha permitido echar un primer vistazo a los pasos iniciales de la fotosíntesis que descomponen el agua en oxígeno e hidrógeno.

Pero volvamos al laboratorio subterráneo y a 2009. Había mucho en juego cuando los pulsos de rayos X comenzaron a aniquilar los cristales que con tanto cuidado habíamos formado. Numerosos científicos habían sentenciado que la SFX nunca funcionaría y habían rechazado nuestras peticiones de fondos. Entonces, nuestros monitores comenzaron a llenarse de bellas imágenes de dispersión de rayos X. Aún recordamos nuestras exclamaciones ante la prueba de que había nacido un nuevo campo en la ciencia de los rayos X.

VISIÓN DE RAYOS X

Antes de la llegada de la SFX ya se habían logrado grandes avances en la detección de cambios en estructuras químicas. Sin embargo, nadie había podido observar las estructuras biológicas más delicadas y complejas en acción. En los años ochenta, el químico del Instituto de Tecnología de California Ahmed H. Zewail, ya fallecido, ideó un método para observar el movimiento de los átomos durante las reacciones químicas por medio de pulsos ultrarrápidos de luz láser visible. Sin embargo, la longitud de onda de la luz era demasiado grande para distinguir los detalles más diminutos de las proteínas. Tiempo después, una serie de avances en microscopía lograron obtener imágenes de resolución casi atómica de proteínas y virus, pero estas técnicas no eran lo suficientemente rápidas para captar reacciones tan veloces como la fotosíntesis.

Nosotros optamos por los rayos X, los cuales proporcionan la rapidez y la resolución necesarias para registrar las reacciones biológicas en acción. La clave de nuestro trabajo fue el desarrollo de una técnica que permitía tomar imágenes de las moléculas justo antes de destruirlas. La manera tradicional de determinar las posiciones de los átomos en una proteína consiste en hacer crecer grandes cristales de estas moléculas. Después, se disparan contra ellos haces de rayos X y se registra el patrón de difracción, lo que permite deducir la posición y la identidad de los átomos. Este método recibe el nombre de cristalografía de rayos X. La SFX usa el mismo principio, solo que mucho más rápido.

No obstante, los rayos X destruyen las moléculas que intentamos ver. Se creía que los láseres de rayos X, los cuales

PÁGINAS ANTERIORES: BRYAN CHRISTIE

Cinematografía molecular

La fotosíntesis, clave de la vida en la Tierra, convierte la luz solar en energía química. Una nueva técnica ha permitido obtener las primeras imágenes de este proceso en acción. Un haz de luz visible desencadena la reacción en las proteínas implicadas. Acto seguido, un potente láser de rayos X toma instantáneas de los cambios que sufren esas biomoléculas en las fracciones de segundo que preceden a su destrucción por el propio láser. Las tomas se realizan en cinco pasos (*abajo*) y se combinan después para formar una película del proceso.

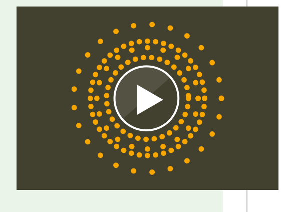
1 Un tipo de proteína sensible a la luz (un fotosistema) se hace crecer en forma de diminutos cristales, en los que la disposición ordenada de múltiples proteínas posibilita determinar su estructura. Cientos de miles de cristales fluyen por el inyector cada segundo.

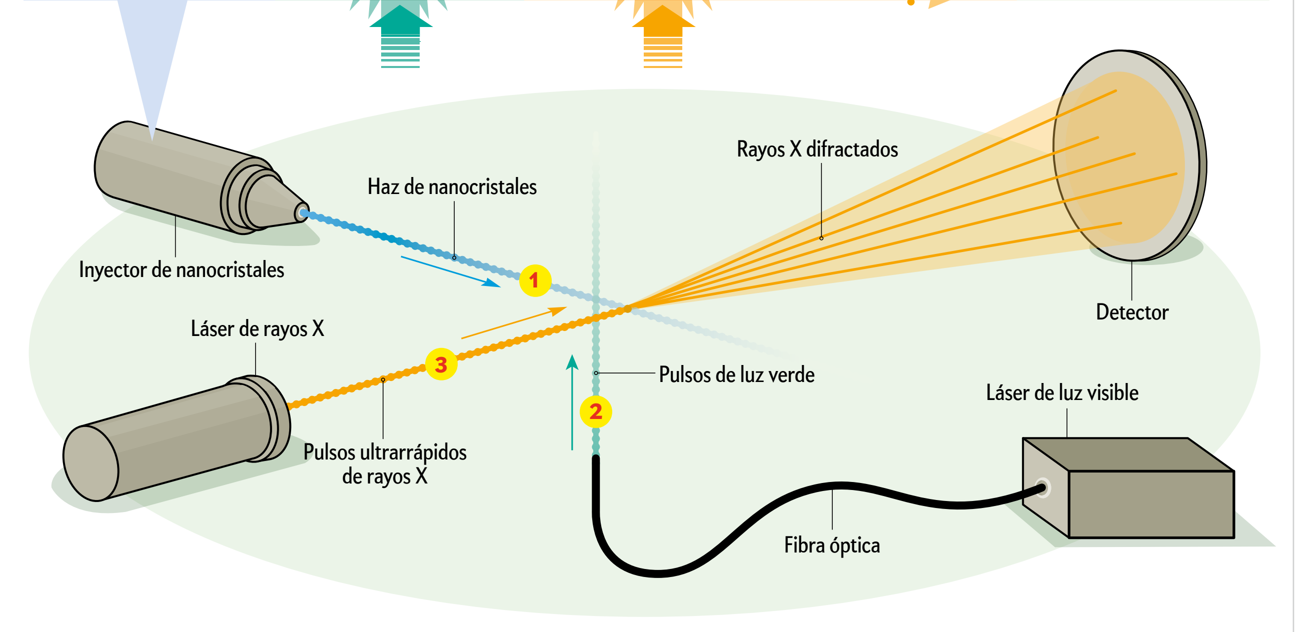
2 Unos pulsos de luz verde, que simulan la luz solar sobre una hoja, desencadenan cambios en las moléculas de los nanocristales. Este primer paso de la fotosíntesis dura solo unos femtosegundos (milésimas de billonésima de segundo).

3 Sobre los cristales incide un potente pulso de rayos X, los cuales se dispersan creando un patrón característico. Esa «instantánea» revela la estructura molecular tal y como es en ese momento. Para tomar el siguiente fotograma, el experimento se repite dejando un intervalo mayor entre el pulso de luz verde y el de rayos X.

4 El pulso de rayos X apenas dura 50 femtosegundos, pero es tan intenso que destruye la proteína.

5 Un programa informático ensambla decenas de miles de instantáneas bidimensionales para crear una imagen en 3D. La sucesión de varias de ellas tomadas en momentos diferentes permite crear una secuencia cinematográfica.





LUCY READING-IKKANDA

concentran esta radiación de alta energía en un potente haz, solo empeorarían las cosas: su luz puede perforar el acero, por lo que parecería que una frágil biomolécula no tendría la menor oportunidad. Así pues, necesitábamos una técnica que se adelantase al daño causado por la radiación y que captase la imagen en pocos femtosegundos. Para hacernos una idea de esta escala de tiempo, baste decir que la diferencia entre un femtosegundo y un segundo entero equivale a la que hay entre un segundo y 32 millones de años.

La clave de la SFX se encuentra en esa imperceptible franja de tiempo que media entre el momento en que la molécula recibe el pulso láser y el instante en que los rayos X arrancan los electrones de sus átomos. Despojados de estos, los restos con carga positiva se repelen entre sí, lo que hace que la molécula explote.

Nuestra técnica funciona del siguiente modo: primero formamos un diminuto cristal con las moléculas; luego disparamos contra él un potente haz de rayos X en un pulso muy corto, de la duración justa para que una parte de los rayos X sean dispersados por el cristal antes de que el haz destruya las moléculas; por último, un detector capta los rayos X dispersados, los cuales revelan el tipo y la posición de los átomos en la proteína.

Tomando desde diferentes ángulos imágenes de una corriente de cristales en el momento en que pasan a través del haz de rayos X, podemos recrear su estructura en 3D. Finalmente, juntamos las imágenes correspondientes a distintos instantes de una reacción y componemos con ellas una secuencia, como si se tratase de fotogramas.

VISTA CRISTALIZADA

El primer paso hacia la consecución de estas películas moleculares se dio en el año 2000, cuando Janos Hajdu y Richard Neutze, por entonces ambos en la Universidad de Uppsala, calcularon que, tras ser bombardeada con rayos X, una molécula tardaría unos 10 femtosegundos en explotar. Así pues, teníamos que tomar instantáneas en esa ventana de tiempo. En 2006, Henry Chapman, ahora en el Sincrotrón Alemán de Electrones (DESY), y sus colaboradores emplearon la idea de «difracta y destruye» para captar una imagen de baja resolución de dos pequeños muñecos y un sol grabados en una membrana de nitruro de silicio.

Pero ¿funcionaría con las delicadas moléculas orgánicas? Cuando lo propusimos, buena parte de la comunidad científica se mostró escéptica. Nuestras diez primeras solicitudes de subvención fueron rechazadas: se nos dijo que los pulsos de rayos X no serían lo bastante cortos, que los cristales de proteína serían demasiado pequeños para proporcionar alguna señal detectable, o que nunca podríamos descubrir cuál era la orientación del cristal cuando era alcanzado por el pulso, una información necesaria para determinar su estructura.

Pero pensamos que, si era posible tomar imágenes de otras moléculas, como había demostrado Chapman, lo mismo debía aplicarse a las biológicas. Una de nosotros (Fromme) y su equipo quisieron establecer la validez de la SFX sometiéndola a una de las pruebas más difíciles imaginables: el estudio del fotosistema I. Con 36 proteínas y más de 300 pigmentos verdes y naranjas para captar la luz, se trata de una de las estructuras proteicas más complejas analizadas con rayos X hasta la fecha. Fromme conocía bien el fotosistema I, pues había trabajado durante años para cristalizarlo y determinar su estructura con otros métodos. Creíamos también que el gran tamaño de ese complejo molecular podría ser en realidad una ventaja, ya que incluso con un pequeño número de patrones de difracción podríamos conseguir una imagen de baja resolución reconocible. Eso era precisamente lo que íbamos a lograr en aquel laboratorio subterráneo en 2009.

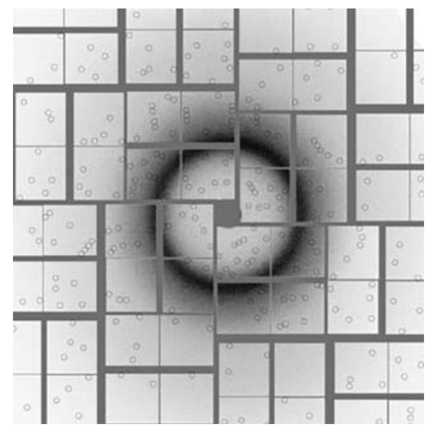
LA BELLEZA DE LO DIMINUTO

Para obtener nuestra instantánea, lo primero que necesitábamos eran cristales del fotosistema I. En cristalografía tradicional se hacen crecer cristales de gran tamaño, ya que así puede dispersarse la cantidad suficiente de rayos X para reconstruir la estructura de la proteína. Sin embargo, obtener cristales grandes y bien ordenados de algunas proteínas puede requerir años de experimentación. Con varias había resultado imposible; el fotosistema I era una de ellas.

Por el contrario, la SFX usa cristales de tamaño nanométrico, los cuales pueden producirse con mucha mayor facilidad. Pero los nanocristales plantean nuevas dificultades. No solo había que obtener señales de intensidad suficiente a partir de cristales tan pequeños, sino que nos enfrentábamos a problemas básicos de física. ¿Cómo detectar nanocristales tan pequeños que no pueden verse con un microscopio? ¿Cómo colocarlos frente a pulsos de rayos X y hacerlo como es debido 120 veces por segundo?

El primer paso consistía en inventar nuevas formas de ver los nanocristales. Uno de los métodos que aplicamos, denominado SONICC (por las iniciales en inglés de «toma de imágenes no lineal de segundo orden de cristales quirales»), hace que los cristales conviertan dos pulsos ultrarrápidos de luz infrarroja en un fotón verde. Como consecuencia, se iluminan como luciérnagas en la noche, lo que nos permitía detectarlos.

Otro método dispara los cristales hacia el interior del pulso láser de rayos X a un ritmo constante. Uno de nosotros (Spence), junto con Uwe Weierstall y Bruce Doak, de la Universidad Estatal de Arizona, concibió un dispositivo que funcionaba de manera muy similar a una impresora de inyección de tinta: disparaba a través del haz de rayos X un chorro de una solución con nanocristales. Este inyector es capaz de lanzar los nanocristales con tanta precisión que estos avanzan hacia el haz en fila india.



EN EL PUNTO DE MIRA: Las manchas grises de estos paneles muestran el patrón que dejan los rayos X tras colisionar contra cristales de proteínas. Gracias a ello puede inferirse la estructura de estas moléculas.

DE: «SERIAL FEMTOSECOND CRYSTALLOGRAPHY DATASETS FROM G PROTEIN-COUPLED RECEPTORS», THOMAS A. WHITE ET AL. EN *SCIENTIFIC DATA*, VOL. 3, ART. N.° 160.057. PUBLICADO EN LÍNEA EL 1 DE AGOSTO DE 2016.

Para que el inyector no se atascase, Weierstall tuvo que diseñar una boquilla ancha que, aun así, siguiese produciendo un chorro fino. Para ello rodeó el borde externo de la boquilla con una corriente de helio gaseoso. Como consecuencia, el chorro de cristales adoptaba un grosor mucho menor que el de un cabello humano, aunque la boquilla misma era más de diez veces mayor.

Una vez la maquinaria estuvo lista, hubimos de hacer frente a un problema más: manejar un monte Everest de datos. Un solo experimento puede generar hasta cien teraoctetos, lo suficiente para llenar 25 discos duros de gran capacidad. Y, para producir imágenes en 3D, teníamos que encontrar entre decenas de miles de instantáneas las orientaciones correctas de cada uno de los cristales y luego fusionarlas. En colaboración con Richard Kirian y Thomas White, miembros del equipo de Chapman en DESY, desarrollamos los programas informáticos necesarios para convertir aquel tsunami de datos en precisas imágenes tridimensionales de una molécula.

Paso a paso fuimos mejorando nuestra técnica. Y, en 2014, logramos echar el primer vistazo en tiempo real al proceso de transferencia de electrones entre dos protagonistas de la fotosíntesis: el fotosistema I, captador de gran tamaño de la luz solar, y una proteína llamada ferredoxina. Cuando la luz incide en el fotosistema I se liberan electrones, los cuales son transportados por la ferredoxina y usados después durante la conversión del CO_2 en biomoléculas. Una vez que la ferredoxina se marcha, los cristales de proteína se disuelven con rapidez, lo que dificulta seguir la reacción. Solo los procesos ultrarrápidos de la SFX logran ver esos veloces cambios.

El siguiente reto en esta línea de investigación coincide con uno de los grandes intereses de Fromme: desentrañar la manera

en que una planta descompone el agua en hidrógeno y oxígeno valiéndose únicamente de la luz solar y de los abundantes metales de la Tierra. Imitar ese proceso nos permitiría obtener hidrógeno barato cuya combustión, no contaminante, alimentaría automóviles y generadores de electricidad.

Por ahora ya hemos reunido las primeras instantáneas de baja resolución del proceso de escisión del agua y hemos obtenido pistas de algunos de los cambios estructurales significativos que tienen lugar en el fotosistema II, el complejo proteico que participa en el proceso. Hace poco, el grupo de Jian-Ren Shen, de la Universidad de Okayama, ha aplicado la SFX para mostrar la misma instantánea pero con más detalle. Nuestro siguiente paso será intentar crear películas de alta resolución que nos muestren los detalles del proceso a nivel atómico.

FÁRMACOS DE DISEÑO

Las películas que hemos comenzado a filmar gracias a la SFX no solo prometen grandes avances futuros, sino también beneficios más inmediatos; entre ellos, nuevos y mejores medicamentos. Vimos esta posibilidad al estudiar los bloqueadores del receptor de la angiotensina II (BRA). Estos fármacos interfieren con un receptor celular de la hormona angiotensina II, que constriñe los vasos sanguíneos, y se usan para tratar la hipertensión, una de las principales causas de ictus y fallos cardíacos. Aunque la primera generación de estos medicamentos ha demostrado su utilidad, los BRA solo se unen débilmente a su diana. Ello obliga a administrarlos en grandes dosis, lo que empeora sus efectos secundarios (dolor de cabeza, mareo y, en ocasiones, problemas más considerables, como hinchazón del rostro y la garganta).

Nuestras investigaciones han revelado por qué esas uniones son tan débiles: el fármaco no encaja en el receptor tan bien como debería, por lo que numerosas moléculas se desprenden. Un conocimiento más preciso de la estructura de los receptores ayudaría a diseñar nuevos BRA que controlasen mejor la presión sanguínea. Y, de hecho, ya se están evaluando las propiedades de un nuevo medicamento, llamado ZD7155.

Las mismas mejoras podrían aplicarse a otros fármacos. Los receptores de la angiotensina II pertenecen a un grupo mayor y sumamente importante de receptores celulares: los receptores acoplados a proteínas G. Estas moléculas de la superficie celular permiten que las células capten cómo es el entorno y reaccionen a él. El descubrimiento de su estructura y funcionamiento se vio reconocido en 2012 con la concesión del Nobel de química. En concreto, el papel clave de estos receptores en la supervivencia y multiplicación celular los convierte en dianas cruciales para nuevos fármacos [*véase* «Arquitectos de la comunicación celular», por Javier González Maeso; Investigación y Ciencia, marzo de 2016]. Ver cómo cambia su estructura ayudará a diseñar medicamentos que encajen con ellos de modo preciso y en su estado activo, lo que reduciría los efectos secundarios.

Vadim Cherezov, investigador de la Universidad de California del Sur que realizó el experimento de la angiotensina II, ha señalado que, en todos los modelos moleculares previos, las mejores conjeturas acerca de cómo encajaban el receptor y el fármaco estaban equivocadas en numerosos aspectos. Por ejemplo, la SFX ha revelado diferencias entre la estructura de los receptores acoplados a proteínas G a temperatura ambiente y la que estos exhiben a las temperaturas criogénicas que suelen usarse en cristalografía. Ello implica que los fármacos diseñados para los receptores a bajas temperaturas no funcionarán igual en el cálido cuerpo humano. Por otro lado, en ocasiones los medicamentos actúan sobre dianas demasiado genéricas. Ese es el problema del que adolecen los medicamentos contra la enfermedad del sueño: nuestras películas moleculares han mostrado que estos interaccionan de manera similar con las proteínas del parásito y con las de las células humanas. Nuestras imágenes, más precisas, brindan a los químicos la oportunidad de crear medicamentos que afecten solo al parásito, no a las personas.

LOS MISTERIOS DEL OJO

Nuestra SFX también se está usando para abordar otras preguntas. Marius Schmidt, de la Universidad de Wisconsin-Milwaukee, y sus colaboradores la han usado para averiguar cómo ven nuestros ojos. Aunque no solemos pensar que las bacterias sean capaces de ver, lo cierto es que cuentan con proteínas que responden a la luz, precursoras evolutivas de las que hay en nuestro sistema visual. La posibilidad de captar instantáneas con una rapidez sin precedentes ha permitido a estos investigadores filmar un vídeo a cámara ultralenta de procesos extraordinariamente veloces, los cuáles han revelado la manera en que las proteínas de las bacterias captan la luz y responden a ella.

El grupo empleó la SFX para captar una sucesión de imágenes de la proteína cristalizada mientras reaccionaba ante la luz en intervalos de menos de una billonésima de segundo. En concreto, siguieron el movimiento de los átomos de la proteína cuando una molécula de colorante insertada en ella se volvía amarilla al ser iluminada. Por primera vez, fue posible captar la estructura del colorante justo después de haber absorbido la luz pero antes de reaccionar: un estado clave en el proceso de percepción de la luz en todos los organismos, incluidas bacterias y plantas, y el primero en el proceso de la visión humana. Contemplar cómo reacciona esa proteína ante la luz no solo nos ayuda a entender el origen de la visión, sino que nos brinda una imagen sin precedentes del desarrollo de una reacción biológica en las escalas de tiempo ultrarrápidas características de la química. «Eso nos pone espectacularmente cerca de entender la química necesaria para toda forma de vida», señala Schmidt.

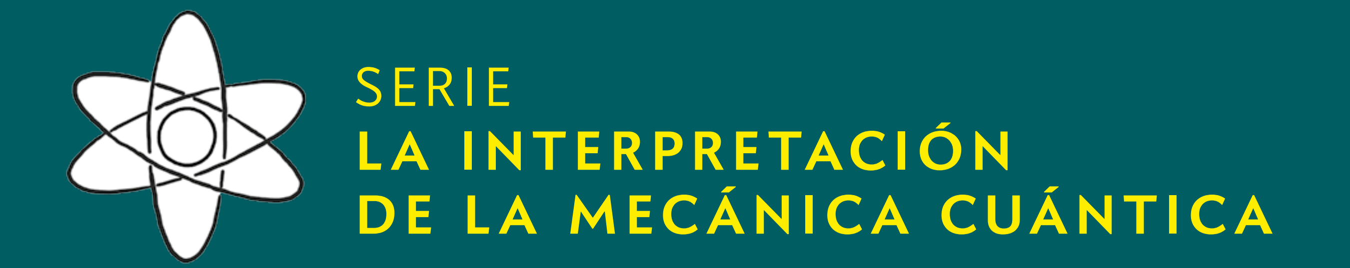
Estamos convencidos de que el futuro de la cristalografía de proteínas se encuentra en la SFX. Y quién sabe: puede que de aquí a diez años la mitad de las estructuras proteicas conocidas no se representen como estáticas imágenes en la página de un libro de texto, sino como películas en 3D. IyC

PARA SABER MÁS

Femtosecond X-ray protein nanocrystallography. H. N. Chapman et al. en *Nature*, vol. 470, págs. 73-77, febrero de 2011.
X-ray lasers for structural and dynamic biology. J. C. H. Spence, U. Weierstall y H. N. Chapman en *Reports on Progress in Physics*, vol. 75, n.º 10, artículo n.º 102.601, octubre de 2012.
X-ray science: The big guns. M. Mitchell Waldrop en *Nature*, vol. 505, págs. 604-606, enero de 2014.
XFELs open a new era in structural chemical biology. P. Fromme en *Nature Chemical Biology*, vol. 11, n.º 12, págs. 895-899, diciembre de 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

El movimiento de las proteínas. Oscar Millet en *IyC*, abril de 2009.
Microscopía electrónica ultrarrápida. Ahmed H. Zewail en *IyC*, octubre de 2010.
Rayos X para escudriñar el nanocosmos. Gerhard Samulat en *IyC*, junio de 2012.
El láser de rayos X definitivo. Nora Berrah y Philip H. Bucksbaum en *IyC*, marzo de 2014.
Un nuevo microscopio de rayos X. Alejandro Turpin y Antonio Picón en *IyC*, septiembre de 2016.



La mecánica cuántica, contada de otra forma

¿Por qué la física cuántica resulta tan difícil de divulgar? ¿A qué se debe el continuo debate sobre su interpretación? ¿Es posible explicar a los no expertos los términos esenciales de ese debate sin caer en analogías engañosas?

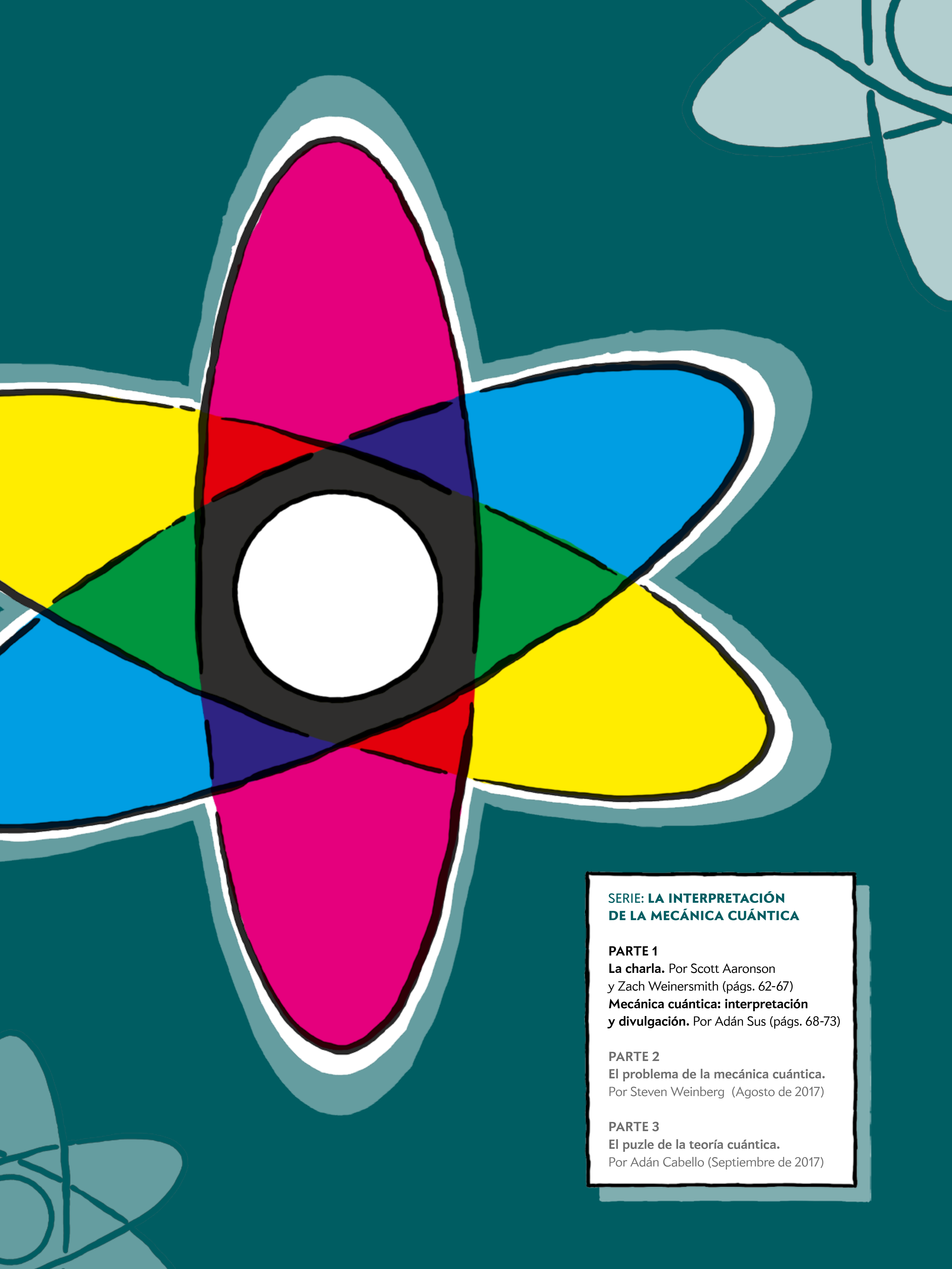
La serie de artículos que aquí comienza pretende dar respuesta a las dos primeras preguntas y contestar de manera afirmativa a la tercera. Para ello contaremos con cuatro investigadores expertos en la materia y nos apoyaremos en un formato muy poco explorado en el ámbito de la divulgación científica: el cómic.

La historia gráfica que abre la serie («La charla», pág. 62) aborda de forma magistral varios conceptos que rara vez se ven explicados con mayor claridad en otros formatos más tradicionales. Escrita por el experto en computación cuántica Scott Aaronson y por el humorista gráfico Zach Weinersmith, la narración lanza al mismo tiempo una áspera crítica a la manera en que en ocasiones se popularizan dichas ideas. En el artículo que sigue («Mecánica cuántica: interpretación y divulgación», pág. 68), el filósofo de la ciencia Adán Sus se pregunta por las distorsiones en las que tan a menudo incurre la divulgación de la mecánica cuántica y, a partir de un análisis histórico y filosófico, las relaciona con la perpetua controversia sobre la interpretación de la teoría.

Las cuestiones interpretativas serán analizadas en las dos entregas siguientes desde una perspectiva que va más allá del clásico debate entre Einstein y Bohr. En el número de agosto, Steven Weinberg, premio nóbel y uno de los padres del modelo estándar de la física de partículas, desgranará las dificultades que en tiempos recientes ha comenzado a apreciar en la teoría. Por último, en la revista de septiembre, el experto en fundamentos de la teoría cuántica Adán Cabello redefinirá desde una óptica novedosa tales críticas y defenderá por qué pueden —y deberían— abordarse desde una perspectiva científica, no metafísica. En el espíritu de la serie, ambos artículos estarán también ilustrados por las viñetas de Weinersmith.

Esperamos que esta combinación de humor y rigor contribuya a aclarar el estado moderno de un debate que, como pocos en la historia de la ciencia, ha cautivado siempre a legos y a expertos.

—La redacción



SERIE: **LA INTERPRETACIÓN DE LA MECÁNICA CUÁNTICA**

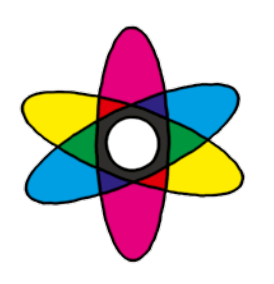
PARTE 1
La charla. Por Scott Aaronson y Zach Weinersmith (págs. 62-67)
Mecánica cuántica: interpretación y divulgación. Por Adán Sus (págs. 68-73)

PARTE 2
El problema de la mecánica cuántica. Por Steven Weinberg (Agosto de 2017)

PARTE 3
El puzle de la teoría cuántica. Por Adán Cabello (Septiembre de 2017)



Scott Aaronson es catedrático de ciencias de la computación en la Universidad de Texas en Austin. Su investigación se centra en las posibilidades y los límites de la computación cuántica y en la teoría de la complejidad computacional.



Zach Weinersmith es humorista gráfico especializado en ciencia y tecnología y autor de la web de cómics *Saturday Morning Breakfast Cereal*. Sus trabajos han aparecido publicados en numerosos medios de prestigio internacional. Es autor de *Soonish: Ten emerging technologies that'll improve and/or ruin everything* (Penguin Press, octubre de 2017).

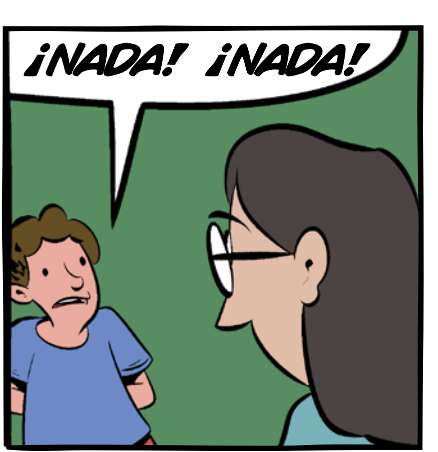


FÍSICA CUÁNTICA

La charla

Scott Aaronson y Zach Weinersmith

































PERO, SI ES ASÍ... ¿QUÉ VENTAJAS TIENE LA COMPUTACIÓN CUÁNTICA?

CIELO, LA SUPERPOSICIÓN NO QUIERE DECIR "Y", PERO TAMPOCO "O".

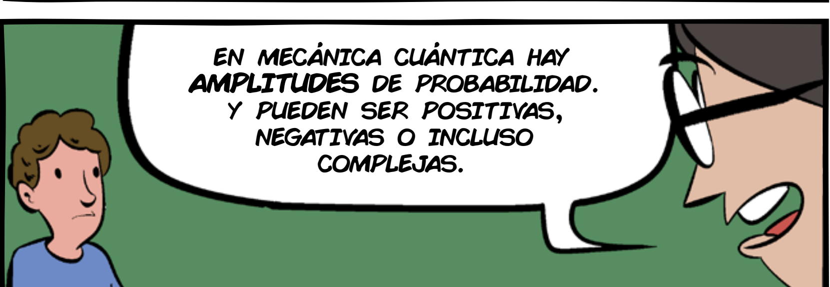

QUIERE DECIR UNA COMBINACIÓN LINEAL COMPLEJA DE UN ESTADO 0 Y UN ESTADO 1. TIENES QUE VERLO COMO UNA NUEVA CATEGORÍA ONTOLÓGICA: UNA MANERA DE COMBINAR COSAS QUE NO SE CORRESPONDE CON NINGÚN CONCEPTO CLÁSICO.


ESPERA. ¿VOSOTROS PONÉIS NÚMEROS COMPLEJOS EN VUESTRAS ONTOLOGÍAS?
SÍ. Y NOS ENCANTA.
PUAJ


UN MOMENTO... ¡ESO SIGNIFICA QUE UN QUBIT ES UN VECTOR UNITARIO EN UN ESPACIO DE HILBERT DE DOS DIMENSIONES!


¡SÍ! LA MECÁNICA CUÁNTICA NO ES MÁS QUE CIERTA GENERALIZACIÓN DE LA PROBABILIDAD.


PERO LA PROBABILIDAD QUE TE ENSEÑARON EN PREESCOLAR SOLO PERMITÍA NÚMEROS REALES ENTRE 0 Y 1.


EN MECÁNICA CUÁNTICA HAY AMPLITUDES DE PROBABILIDAD. Y PUEDEN SER POSITIVAS, NEGATIVAS O INCLUSO COMPLEJAS.


CUANDO HACES UNA MEDIDA, HAY UNA REGLA PARA CONVERTIR ESAS AMPLITUDES EN PROBABILIDADES ORDINARIAS. PERO CUANDO NO MIRAS, LAS AMPLITUDES... BUENO, A VECES HACEN ALGO MUY ESPECIAL Y PRIVADO ENTRE SÍ. ALGO MUY... ÍNTIMO.


¿INTERFERENCIA?


HOY LOS NIÑOS CRECÉIS TAN RÁPIDO.


ESO ES. Y SI UN SUCESO PUEDE OCURRIR DE UNA MANERA CON UNA AMPLITUD POSITIVA Y DE OTRA CON UNA AMPLITUD NEGATIVA, UNA Y OTRA PUEDEN INTERFERIR DESTRUCTIVAMENTE Y CANCELARSE. ASÍ QUE LA AMPLITUD TOTAL ES CERO...
¡Y EL SUCESO NO TIENE LUGAR!

¡EXACTO! ESO ES LO QUE DIFERENCIA LA MECÁNICA CUÁNTICA DE LA PROBABILIDAD DE TODA LA VIDA.













HOY VIVIMOS EN UNA CULTURA MÁS ABIERTA. Y LOS CHICOS PUBLICAN SUS PRIMEROS ARTÍCULOS DE COMPUTACIÓN CUÁNTICA CADA VEZ ANTES. TU PADRE Y YO NO ESTÁBAMOS SEGUROS DE QUE FUESE EL MOMENTO DE CONTARTE TODO ESTO. PERO ESTÁS CRECIENDO, Y NO QUERÍAMOS QUE... QUE COMETIESES UN ERROR.








MONTONES DE COSAS. SUS PROPIAS MANOS. INCLUSO RATONES Y RANAS.

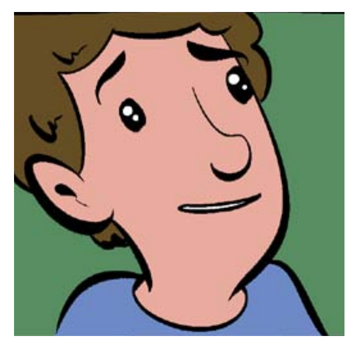

CARIÑO, NO ES CIERTO. NADIE HA CONSEGUIDO CREAR INTERFERENCIAS CUÁNTICAS CON OBJETOS DE ESE TAMAÑO. NO ES MÁS QUE UNA FANTASÍA QUE A VECES LA GENTE MENCIONA EN LAS REVISTAS.


CUANDO SEAS MAYOR APRENDERÁS QUE UN QUBIT ES QUISQUILLOSO. NO INTERFIERE A MENOS QUE ESTÉ INCREÍBLEMENTE BIEN AISLADO DEL ENTORNO.


DE LO CONTRARIO, ES COMO SI EL RESTO DEL UNIVERSO LO ESTUVIESE OBSERVANDO. Y EL QUBIT SE AVERGÜENZA Y NO PUEDE... YA SABES... DAR LA TALLA.

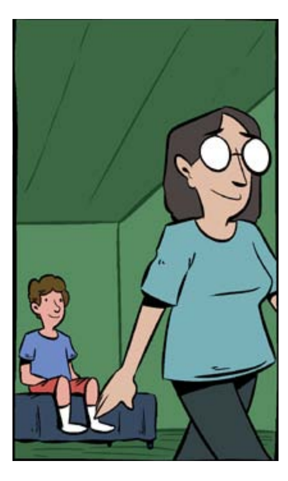

Y CUANTO MÁS GRANDE ES ALGO, MÁS DIFÍCIL RESULTA DE AISLAR.
Y POR ESO LOS QUBITS SON DEMASIADO PEQUEÑOS PARA APRECIARLOS A SIMPLE VISTA.


NO ES EL TAMAÑO LO QUE IMPORTA. ES LA ROTACIÓN EN UN ESPACIO VECTORIAL COMPLEJO.




GRACIAS, MAMÁ.






¿MAMÁ?
¿SÍ?


¿Y QUÉ PASA CON TODO LO DEMÁS, COMO EL PRINCIPIO DE INCERTIDUMBRE DE HEISENBERG, LA DUALIDAD ONDA-PARTÍCULA O EL EFECTO TÚNEL? HE OÍDO QUE ALGUNA GENTE INCLUSO BUSCA ACCIONES FANTASMALES A DISTANCIA.















SI USTED NO HABLA CON SUS HIJOS SOBRE COMPUTACIÓN CUÁNTICA...



PARA SABER MÁS

Quantum computing since Democritus. Scott Aaronson. Cambridge University Press, 2013.

EN NUESTRO ARCHIVO

Procesamiento cuántico de la información. Antonio Acín en *IyC*, septiembre de 2006.

Los límites de la computación cuántica. Scott Aaronson en *IyC*, mayo de 2008.

Adán Sus es licenciado en física y profesor del Departamento de Filosofía de la Universidad de Valladolid. Sus investigaciones se centran en la filosofía de la física.

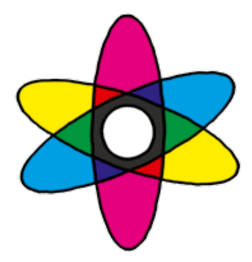


FÍSICA CUÁNTICA

Mecánica cuántica: interpretación y divulgación

Pese a su incomparable éxito predictivo, la teoría cuántica sigue presentando problemas de interpretación y sufriendo distorsiones en su comunicación. ¿A qué se debe?

Adán Sus



En los libros y revistas de divulgación podemos leer con frecuencia que la mecánica cuántica incorpora efectos no locales o «acciones a distancia». Al mismo tiempo, sin embargo, también se nos dice que la teoría resulta compatible con la relatividad especial de Einstein, la cual prohíbe la transmisión de señales instantáneas. A menudo oímos hablar de gatos que están vivos y muertos al mismo tiempo, si bien según el formalismo cuántico la probabilidad de que un experimento nos permita observar ese supuesto estado indefinido es estrictamente cero.

Fuera del ámbito científico y divulgativo, la confusión en torno a la mecánica cuántica no parece conocer límites: la teoría se ha relacionado con el holismo oriental, con el poder creador de la consciencia, con la capacidad de los sujetos para diseñar su propio destino y con la existencia de realidades alternativas en las que elegimos aquello que hemos rehusado en esta. Hoy en día incluso se llegan a ofrecer tratamientos «cuánticos» para todo tipo de enfermedades, incluido el cáncer. ¿Qué hace que la física cuántica se vea expuesta a este tipo de distorsiones?

Por supuesto, ninguno de los últimos ejemplos que acabamos de mencionar guarda una verdadera relación con la teoría. Algunos constituyen meras apropiaciones indebidas de su vocabulario; otros se basan en extrapolaciones injustificadas que exageran los rasgos más llamativos de alguna de sus interpre-

EN SÍNTESIS

La mecánica cuántica ha entrado de lleno en la cultura popular. Con gran frecuencia, sin embargo, lo ha hecho acompañada de mensajes poco claros e incluso fuertes distorsiones.

El fenómeno puede relacionarse con la dificultad para interpretar la teoría; es decir, para reconciliar su formalismo con nuestras intuiciones naturales acerca del mundo físico.

¿Se debe la mala comunicación de la mecánica cuántica a la falta de una interpretación clara? ¿U obedece más bien a la insistencia que muchos ponen en buscar una interpretación que, en el fondo, resulta innecesaria?

Dicho debate guarda una estrecha conexión con dos posturas filosóficas: el realismo y el instrumentalismo. Una mirada atenta a la historia de la ciencia y al cambio que supuso la llegada de la mecánica cuántica revela por qué resulta tan difícil renunciar por completo a cualquiera de ellas.



taciones. No son interpretaciones en ningún sentido propio del término (una interpretación implica un trabajo riguroso para compatibilizar el formalismo de la teoría con las creencias que tenemos los sujetos acerca del mundo). Sin embargo, estas visiones deformadas sí parecen estar motivadas por ciertos aspectos que dificultan la comprensión de la teoría cuántica.

Tomemos como ejemplo el clásico experimento mental del gato de Schrödinger. La mecánica cuántica parece decirnos que, en algunas circunstancias, hay gatos que están vivos y muertos al mismo tiempo. ¿Es así? Ante esto, podemos rebelarnos y argumentar que no: que la teoría se limita a proporcionarnos un algoritmo que, en tales situaciones, nos permite predecir de manera exitosa la probabilidad de encontrar el gato vivo o muerto; fin de la discusión. El problema llega si no nos conformamos con esta respuesta (ni con la elusiva argumentación de que la teoría no puede aplicarse a sistemas del tamaño de un gato). Y hay razones de sobra para no hacerlo.

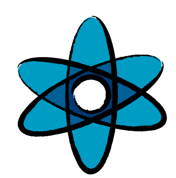
Si pensamos que la teoría logra hacer predicciones porque, de alguna manera, es capaz de describir la realidad, entonces no nos quedará más remedio que enfrentarnos al problema de su interpretación. Y, llegados aquí, quizá la posibilidad de que el gato esté vivo en algunos mundos y muerto en otros comience a parecernos menos inaceptable. O tal vez empecemos a admitir que no resulta tan descabellado considerar que la realidad contenga aspectos no locales. O que lo que llamamos realidad no sea algo que está previamente configurado y esperando a que nosotros lo descubramos.

Se puede afirmar que la mecánica cuántica es mucho más que una excelente teoría científica. Por un lado, excede la calificación de teoría, pues es considerada por la vasta mayoría de los físicos como un marco general que cualquier teoría física debería respetar. Por otro, ha rebasado los límites en los que suelen desarrollarse las teorías científicas y ha entrado de lleno en la cultura popular. Pero, en gran medida, no lo ha hecho tanto por sus impresionantes logros predictivos como por sus dificultades interpretativas y sus consecuencias de apariencia extravagante. Esto nos lleva a un tercer aspecto que la distingue de otras teorías físicas: la mecánica cuántica parece estar especialmente necesitada de una adecuada interpretación.

Todas las afirmaciones anteriores requieren matices, pero muy especialmente la que hace referencia a las necesidades interpretativas de la teoría. Algunos físicos declararían sin ambages que dicha afirmación es falsa; o, al menos, que lo es si con ella entendemos que la teoría es incompleta o que se encuentra

en estado de crisis. No obstante, otros físicos (en particular, los padres fundadores de la teoría), la mayoría de los filósofos de la física y, de manera más difusa, el público en general, sí que estarán de acuerdo —aunque seguramente por motivos distintos— con que la mecánica cuántica exige, más que ninguna otra teoría, un especial esfuerzo interpretativo.

¿En qué se basa dicha percepción? En las líneas que siguen quiero acercarme a la cuestión de la necesidad interpretativa de la mecánica cuántica y a su incidencia en el tipo de recepción que tiene la teoría fuera de los círculos especializados: en su extendida pero difícil inserción en la cultura popular. Al respecto cabe sostener dos posturas enfrentadas y, en principio, plausibles: que el problema de la interpretación resulta central para la definición de la teoría, por lo que no ocuparse de él ejerce efectos devastadores para la forma en que esta se difunde; o que es precisamente el excesivo énfasis en una interpretación innecesaria lo que incita a las distorsiones a la hora de divulgarla. Entrar en esta discusión nos obliga a considerar con detalle en qué consiste interpretar una teoría científica.



REALISMO E INSTRUMENTALISMO

La idea de interpretar una teoría suele incorporar ciertos presupuestos acerca de qué es aquello de lo que hablan las teorías físicas. Dichos presupuestos suelen relacionarse de un modo u otro con una concepción *realista* de las teorías; es decir, con la suposición de que existe una realidad objetiva, independiente del observador, y que la labor de las teorías físicas consiste en describirla. Por tanto, la discusión sobre la necesidad de interpretación de la mecánica cuántica tiene que ver, al menos en parte, con la cuestión del realismo y con su significado.

Por otro lado, las reticencias que muestran algunos físicos con respecto al énfasis que a menudo se pone en la interpretación de la mecánica cuántica se hallan vinculadas al cuestionamiento de esa idea; esto es, al rechazo de que las teorías proporcionen descripciones fidedignas de la realidad. Dicho cuestionamiento puede entenderse, al menos, de dos formas. Por un lado, cabe defender que la mecánica cuántica no debe asumirse con pretensión de describir realidad alguna, sino más bien como un algoritmo para efectuar predicciones sobre los resultados de ciertas intervenciones sobre el mundo (el tipo de intervenciones que llamamos «experimentos»). Esta postura recibe el nombre de *instrumentalismo*. Por otro, puede argumentarse que aquello que describe la teoría no constituye una realidad independiente de los observadores que la describen. Esta posición, sobre la que volveremos más adelante, ha sido denominada recientemente *realismo participativo*.

Una de las virtudes más preciadas de las teorías científicas es, sin duda, su capacidad predictiva. Podría argumentarse que esta no es una virtud entre otras, sino que constituye en gran medida aquello que distingue a las teorías científicas de otras teorizaciones, ya que se encuentra estrechamente relacionada con la posibilidad de confirmación empírica. No obstante, a menudo se piensa que la capacidad predictiva no puede venir sola. Más aún, se entiende que ha de estar vinculada con —o incluso derivarse de— el hecho de que las buenas teorías científicas proporcionan descripciones más o menos aproximadas de la realidad. De manera general, podemos llamar realistas a las concepciones de las teorías científicas que estarían de acuerdo con esta caracterización; es decir, que atribuyen a las teorías la capacidad de describir una realidad subyacente y que fundamentan en ello su éxito predictivo.

No cabe duda de que una postura como esta no quedará exenta de problemas. A fin de cuentas, no parece tarea fácil dar cuenta de la relación entre teoría y mundo. Los numerosos debates que ha suscitado y suscita el realismo científico son una consecuencia de ello y, en gran medida, han servido de estímulo para el desarrollo de una disciplina como la filosofía de la ciencia. Con todo, se puede argumentar que, en líneas generales, tales debates presuponen que las teorías científicas se formulan con pretensión de proporcionar una guía para el descubrimiento de la realidad y que, por tanto, la práctica científica implica alguna forma de realismo. En su sentido más débil, esto solo implicaría asumir que la ciencia tiene, además de sus capacidades predictivas, ciertas pretensiones descriptivas.

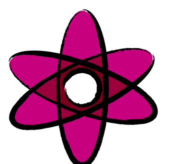
La idea de interpretar una teoría suele relacionarse con una concepción realista del mundo: con la suposición de que existe una realidad objetiva y que la labor de las teorías físicas consiste en describirla

Negar lo anterior es lo que podemos denominar posición instrumentalista. Dicho de manera simple, esta consiste en tomar las teorías físicas como meras herramientas que permiten a los sujetos realizar predicciones sobre un sistema físico a partir de un conjunto de datos iniciales conocidos. Según esto, para dar cuenta de la capacidad predictiva de las teorías no resultaría necesario presuponer que estas describen de manera fiel una realidad subyacente. Eso será una ilusión que tal vez opere en la psicología de algunos físicos, pero carecería de relevancia para explicar el éxito de las teorías.

La dicotomía entre realismo e instrumentalismo plantea dos debates muy distintos. Por un lado, la cuestión sobre cuál de las dos posturas proporciona un mejor marco conceptual para entender qué son las teorías científicas, qué motiva el cambio científico y, en definitiva, en qué consiste la validez empírica. Por otro, si los físicos muestran una marcada tendencia a favor de una u otra actitud. Debemos tener en cuenta que, en último término, realismo e instrumentalismo constituyen formas de entender la actividad científica que habrán de legitimarse por su capacidad para dar sentido al conjunto de la práctica que denominamos ciencia, más allá de las intuiciones que cada uno de nosotros tenga. Aunque no podamos profundizar en ninguno de estos debates, sí nos interesa el efecto que tiene la existencia de estas posturas enfrentadas, así como su distribución diferencial entre los grupos de físicos, filósofos de la física y público general, en el problema de la interpretación y la recepción de la mecánica cuántica.

Del mismo modo que antes, al abordar la relación entre realismo, instrumentalismo y divulgación, podemos defender dos tesis contrapuestas. La primera argumentaría que es el realismo

imperante entre los filósofos y el público general el principal responsable de la mala difusión que se hace de la mecánica cuántica: sería la pretensión de interpretar la teoría forzándola a encajar con nuestras intuiciones realistas lo que termina desvirtuando su comunicación al gran público. La segunda achacaría la confusión que reina en la divulgación a la desidia interpretativa de algunos físicos, la cual estaría vinculada, precisamente, a su actitud instrumentalista. Estas dos posiciones son sin duda extremas y en cierto sentido idealizadas. No obstante, su formulación puede sernos útil para entender el origen del problema.



LA LLEGADA DE LA MECÁNICA CUÁNTICA

Con anterioridad a la formulación de la mecánica cuántica, la actitud realista con respecto a las teorías físicas no parecía plantear especiales problemas. Una interpretación literal de las teorías físicas precuánticas se antoja perfectamente plausible: no hay dificultad en asumir que estas describen sistemas físicos con una realidad independiente y que, en principio, son capaces de reflejar todas sus propiedades físicas. De ahí que podamos concluir, sin demasiada controversia aparente, que la actitud dominante en la historia de la ciencia ha sido de corte realista: como si las teorías científicas proporcionasen descripciones similares a las precientíficas pero más refinadas, sin especiales problemas de interpretación.

En realidad las cosas nunca fueron tan sencillas —no hay más que echar un vistazo a las discusiones sobre cómo entender nociones tan elementales como espacio y tiempo—, pero esa situación cambió de manera radical con la irrupción de la mecánica cuántica. Veamos de qué manera.

En física clásica, los estados posibles de un sistema pueden representarse matemáticamente como puntos en un espacio de fases: en esencia, el conjunto de todas las posiciones y velocidades que puede adoptar el sistema. A su vez, las propiedades del sistema físico en cuestión pueden expresarse como funciones de las coordenadas de dichos puntos, y su evolución viene dada por una trayectoria única en el espacio de fases. Esto se presta a una interpretación natural: los sistemas físicos se encuentran en estados en los que todas sus propiedades se hallan siempre bien definidas, algo que encaja a la perfección con algunas de nuestras intuiciones más arraigadas.

Lo que se encontraron los físicos a principios del siglo XX fue que, para dar cuenta de ciertos fenómenos microscópicos, la descripción clásica no parecía funcionar. El formalismo que se fue desarrollando incorporaba la posibilidad de representar los estados de un sistema físico como una superposición de otros estados.

Desde el punto de vista matemático, los estados posibles de un sistema cuántico quedan expresados como vectores de un espacio vectorial complejo. Y, como saben bien los estudiantes de álgebra de bachillerato, los espacios vectoriales exhiben la propiedad de que sus elementos pueden expresarse como combinaciones de otros. Así pues, los estados de un sistema cuántico pueden representarse como superposiciones de otros estados, lo que permite que nuestro gato quede descrito por una superposición de los estados «vivo» y «muerto». Interpretado de manera literal, lo anterior implica que hay estados en los que el sistema no tiene algunas propiedades bien definidas. Este es el origen de la dificultad de interpretar la mecánica cuántica de manera realista y lo que señala la especial necesidad de una interpretación.

El formalismo nos faculta para calcular la probabilidad de encontrar tal o cual valor asociado a una propiedad una vez que efectuamos una «medición» sobre el sistema. Sin embargo, no nos permite atribuir valores bien definidos a algunas propiedades de un estado genérico. Si a ello le añadimos que, como consecuencia del mismo formalismo, hay conjuntos de propiedades a las que resulta imposible asignar valores bien definidos de manera simultánea, y que es posible tener sistemas entrelazados, la idea de asignar atributos a un sistema del mismo modo en que lo hacíamos en la física clásica se tornará menos y menos plausible. Varios de los fundadores de la teoría intentaron desarrollar estas ideas en lo que se terminaría denominando, de manera algo confusa, «interpretación de Copenhague».

¿Qué consecuencias implica lo anterior? Para evaluarlas, consideremos un ejemplo. Supongamos que nuestro sistema físico se corresponde con lo que clásicamente denominaríamos una partícula, cuyas propiedades son su posición y su velocidad. ¿Qué significa que una partícula pueda encontrarse en un estado en el que su posición no está determinada? Semejante situación parece requerir un esfuerzo interpretativo, ya que no resulta compatible con lo que sabemos acerca de los objetos a los que solemos denominar partículas ni con la propiedad a la que llamamos posición: una partícula no puede encontrarse en varios lugares al mismo tiempo. Así que tal vez los sistemas de los que habla la teoría no sean partículas. O quizás el formalismo no nos esté describiendo un solo mundo. O puede que la teoría sea incompleta. Todo esto son reacciones iniciales. Convertirlas en posiciones coherentes es tarea de la «interpretación» de la

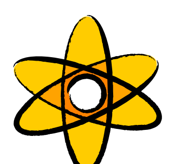
MÁS QUE POR SUS LOGROS PREDICTIVOS, LA MECÁNICA CUÁNTICA HA LLEGADO A LA CULTURA POPULAR POR SUS CONSECUENCIAS DE APARIENCIA EXTRAVAGANTE.



teoría. Renunciar a ella supone dejar vía libre para que florezcan las pseudointerpretaciones.

Una situación como la descrita arriba puede ser considerada altamente indeseable para una teoría científica. Contra esta caracterización reaccionan, seguramente con razón, algunos físicos. Vienen a decir que esta indeterminación interpretativa no afecta a la teoría; los físicos no tienen problemas a la hora de aplicarla, hacer predicciones y corroborar que se cumplen. Y si ocurre así solo puede ser porque, en cierto sentido, sí saben de qué habla la teoría: esta nos dice qué resultados cabe esperar cuando llevamos a cabo un experimento. El problema, según ellos, aparece cuando interpretamos de manera literal los elementos del formalismo, como si estos fuesen un fiel reflejo de algunos aspectos de la realidad física. Esta es la postura crítica que hemos denominado instrumentalista, la cual podría resumirse en el siguiente eslogan: la única interpretación que necesita la mecánica cuántica es aquella que da sentido a la práctica habitual de los físicos que la utilizan.

Pero, como veremos, no queda del todo claro que entender las teorías como un mero algoritmo predictivo pueda explicar la práctica científica en general. Y, por otro lado, tampoco es cierto que todos los que critican la manera en que habitualmente se presenta el problema de la interpretación de la mecánica cuántica estarían de acuerdo con la etiqueta de instrumentalista.



REALIDAD E INFORMACIÓN

Incluso si tomamos como punto de partida la interpretación mínima de la mecánica cuántica, nos encontramos con que su formalismo incorpora ciertos elementos que nos permiten efectuar predicciones. El vector de estado o, de manera equivalente, la función de onda, se emplea para transformar una parte de la información allí contenida en la probabilidad de obtener un resultado u otro en un experimento, algo posible gracias a un algoritmo conocido como regla de Born. Así pues, no cabe duda de que la función de onda contiene información sobre el sistema físico. Pero ¿podemos inferir a partir de ahí que hay algo en la realidad que se corresponde con la función de onda? Como hemos señalado, una postura abiertamente instrumentalista contestará que no, mientras que los enfoques declaradamente realistas querrán responder de manera afirmativa. No obstante, entre aquellos que rechazan un realismo, digamos, «ingenuo», hay muchos que no aceptan ser tomados por instrumentalistas.

Las razones que pueden ofrecerse para situarse en esta posición intermedia son varias. Por un lado, reconocer que el instrumentalismo es una ideología demasiado débil para dar cuenta de la actividad científica: no resulta difícil identificar en investigadores de distintas disciplinas una motivación común relacionada con el descubrimiento de cómo son las cosas. Además, puede defenderse que dicha motivación es relevante para entender el cambio científico a largo plazo. Las razones que suelen ofrecerse en favor de esta posición argumentan que el éxito predictivo de las teorías científicas parece un milagro si no admitimos que, de algún modo, estas describen una realidad subyacente (en jerga filosófica, este razonamiento se conoce como «argumento de los no milagros»). Por último, puede también defenderse que el cambio científico exhibe una cierta continuidad, la cual sugiere una aproximación progresiva de las teorías hacia una mejor descripción de la realidad. Y aunque tales argumentos no sean concluyentes, sí hacen pensar que no deberíamos apresurarnos demasiado para liberarnos de toda dimensión descriptiva de las teorías científicas. Hacerlo podría dejar fuera aspectos esenciales de la ciencia.

Sin embargo, los razonamientos anteriores no nos obligan a abrazar sin más un realismo tradicional. Ya en filosofía existen versiones deflacionarias del realismo científico, las cuales solo están dispuestas a admitir que las teorías reflejan la estructura de la realidad, pero no todos sus aspectos (el denominado *realismo estructural*). En el caso de la mecánica cuántica, defender una posición intermedia entre el realismo tradicional y el instrumentalismo puro supone reconocer que, si bien hay aspectos de la postura realista que tal vez merezca la pena rescatar, quizás haya que poner en cuestión la idea de que la ciencia empírica describe una realidad anterior a la teoría e independiente de ella.

Un divulgador solo puede hacer bien su trabajo si la cuestión que se propone comunicar al gran público cuenta con una imagen clara entre los expertos. Esa no parece ser la situación con respecto al significado de la teoría cuántica

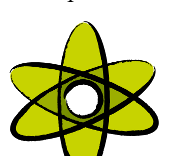
Este punto de vista se ve apoyado por el hecho de que las interpretaciones realistas «tradicionales» de la mecánica cuántica no se encuentran exentas de problemas. Dos de las más populares son la interpretación de muchos mundos de Everett y la mecánica de Bohm. Los everettianos modernos (físicos como David Deutsch, de la Universidad de Oxford, o filósofos de la física como David Wallace, de la Universidad de California del Sur, han revitalizado en los últimos años esta postura) pretenden dar una interpretación lo más literal posible del formalismo cuántico, según la cual la superposición de estados debe entenderse en términos de una multiplicidad de mundos. Esto nos ayudaría a comprender, o a visualizar, qué quiere decir que un sistema posea al mismo tiempo propiedades incompatibles. Sin embargo, el precio a pagar, demasiado alto para muchos, reside en la exuberancia ontológica de este multiverso, por no mencionar los problemas ligados a dar cuenta de la noción de probabilidad en dicha interpretación. La mecánica bohmiana, por otro lado, introduce partículas clásicas guiadas por la función de onda, entendida aquí como un campo físico real. Sin embargo, para ello debe incorporar una fantasmagórica acción a distancia y afrontar dificultades en su formulación relativista. Por último, las llamadas «teorías de colapso», las cuales intentan describir la reducción del paquete de ondas en términos de un proceso físico objetivo sujeto a sus propias leyes dinámicas, adolecen igualmente de sus propios problemas.

Para algunos críticos, lo anterior serían ejemplos de aberraciones producidas al intentar amoldar la mecánica cuántica a esquemas interpretativos clásicos, las cuales mostrarían que su

no clasicidad se manifiesta de distintas maneras. Pensar que todas estas interpretaciones presentan rasgos inaceptables suele venir acompañado de la idea de que la teoría nos obliga a reconsiderar nuestras intuiciones realistas. Llegados a este punto, puede parecer natural preguntarnos por qué no asumir que la mecánica cuántica no se deja interpretar en términos de una realidad independiente del observador. ¿Qué implicaciones tiene esto? ¿Nos ofrece una imagen menos problemática?

Algunas propuestas recientes que apuntan en ese sentido se encuentran relacionadas con el proyecto de entender la mecánica cuántica en términos de la teoría de la información. Antes mencioné que la función de onda proporciona información. Una postura más radical consistiría en defender que los estados cuánticos no son nada más que información y que la mecánica cuántica podría derivarse a partir de varios principios de una eventual teoría de la información. Por otro lado, la información tiene que ver con el conocimiento que posee un sujeto acerca de un sistema. Por tanto, la función de onda no representaría algo objetivo, en el sentido de «estar allí» con independencia de quien la utiliza como recurso descriptivo.

Uno de los defensores de esta estrategia es Christopher Fuchs, físico de la Universidad de Massachusetts en Boston que, en los últimos años, ha desarrollado una interpretación conocida como QBismo (*QBism* en inglés), nombre que tiene su origen en la expresión «bayesianismo cuántico». Según él, se trata de un «realismo participativo» que entiende que buena parte de los elementos de la teoría, como los estados cuánticos, no representan realidades independientes, sino estados relativos al sujeto. Aun así, la teoría tendría también una dimensión objetiva, aunque cuál sea esta no parece quedar claro en el estado actual de la propuesta. Que esto suponga o no algún avance en la comprensión de la mecánica cuántica constituye hoy un asunto tremendamente controvertido. En cualquier caso, nos obliga a revisar algunos de los presupuestos que durante mucho tiempo se consideraron esenciales para entender la actividad científica. Por otro lado, al hacer una mención explícita de un componente subjetivo, no parece más inmune al tipo de exageraciones y extrapolaciones a las que se ven sometidas el resto de las propuestas.



INTERPRETACIÓN Y DIVULGACIÓN

En definitiva, nos encontramos frente a una teoría que, a pesar de su enorme éxito predictivo, se puede afirmar que sigue estando incompleta por el lado de su interpretación. A mi entender, esta no es una cuestión superflua: afecta a la comprensión de la teoría y a su inserción en el proyecto global de la ciencia. Incluso puede afirmarse —aunque sin duda resulte discutible— que la pregunta acerca de la interpretación de la teoría reviste una importancia crucial para afrontar algunos retos centrales, como la formulación de una teoría de la gravitación cuántica. Todo ello nos obliga a prestar debida atención a los debates relativos al significado de la mecánica cuántica y a no intentar ocultarlos debajo de la alfombra.

Además, esta situación de indefinición interpretativa parece estrechamente relacionada con la forma en que la teoría llega al gran público. La falta de consenso en relación con el significado de la teoría constituye un caldo de cultivo más que propicio para la aparición de imprecisiones y exageraciones en la comunicación de la teoría y en su traslado a la cultura popular.

El filósofo de la física Dennis Dieks, de la Universidad de Utrecht, ha argumentado que la extravagancia que encontramos en la divulgación de la mecánica cuántica se debe, en gran medida, al desinterés de la mayoría de los físicos por las preguntas relativas a sus fundamentos. Si bien es cierto que, entre quienes se ocupan de los fundamentos, muy pocos defienden una actitud instrumentalista, no resulta menos claro que hay una mayoría silenciosa que, de manera tácita, sí da la impresión de estar de acuerdo con ella. Sea como fuere, no resulta extraño que el desinterés por los fundamentos, unido a la falta de consenso en la interpretación y, sobre todo, a la imposibilidad de hacer compatible la teoría con el conjunto de intuiciones que usamos para interpretar las teorías clásicas, genere una situación de desconcierto que afecta a su divulgación. A fin de cuentas, como argumenta Dieks, un divulgador solo puede hacer bien su trabajo si la cuestión que se propone comunicar al gran público cuenta con una imagen clara entre los expertos. Esa no parece ser la situación en lo que respecta al significado de la teoría cuántica.

Es cierto que no resulta fácil determinar si pesa más el cariz realista de algunas interpretaciones y las consecuencias que estas implican a la hora de entender la realidad supuestamente descrita por la teoría (resulta difícil no sentirse conmocionado ante la existencia de mundos alternativos o de conexiones no causales entre sistemas físicos) o la actitud instrumentalista de algunos físicos, la cual implica no prestar suficiente atención a los fundamentos de la teoría. En cualquier caso, no parece que la extrañeza asociada con la mecánica cuántica, la cual explotan las falsas interpretaciones, sea fácil de conjurar.

Sea como fuere, la decisión de cuáles sean las consecuencias de la teoría no debería dejarse en manos de presuntos gurús cuánticos. Lo único que podemos hacer es pensarla con rigor. IyC

PARA SABER MÁS

The quantum mechanical worldpicture and its popularization. Dennis Dieks en *Communication & Cognition*, vol. 29, n.º 2, págs. 153-168, 1996.
Quantum theory needs no «interpretation». Christopher A. Fuchs y Asher Peres en *Physics Today*, vol. 53, n.º 3, págs. 70-71, marzo de 2000.
Qbism, the perimeter of quantum bayesianism. Christopher A. Fuchs. Disponible en **arxiv.org/abs/1003.5209**, marzo de 2010.
Scientific realism. Anjan Chakravartty en *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, abril de 2011: **plato.stanford.edu/archives/win2016/entries/scientific-realism**
The emergent multiverse. David Wallace. Oxford University Press, 2012.

EN NUESTRO ARCHIVO

Realismo científico: ¿Sigue el debate? Antonio Diéguez en *IyC*, marzo de 2012.
Más allá del horizonte cuántico. David Deutsch y Artur Ekert en *IyC*, noviembre de 2012.
Bayesianismo cuántico. Hans Christian von Baeyer en *IyC*, agosto de 2013.
¿Qué es real? Meinard Kuhlmann en *IyC*, octubre de 2013.



SALUD



EL MEJOR FÁRMACO PARA CADA UNO

Hoy la medicina personalizada ofrece análisis genéticos que ayudan a evitar las reacciones adversas a los medicamentos, pero los médicos se muestran reacios a usarlos

Dina Fine Maron

EN SÍNTESIS

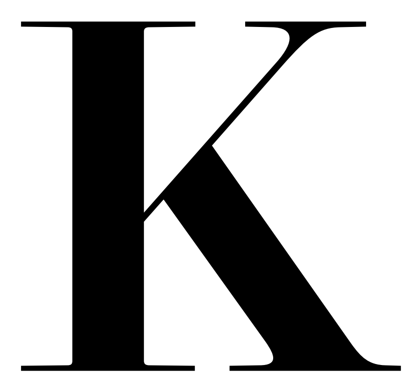
A lo largo de un año cualquiera, casi la mitad de los pacientes hospitalarios reciben un medicamento que podría interaccionar con sus genes y causarle efectos adversos graves.

Las pruebas farmacogenómicas, de bajo coste, podrían evitar estos efectos potencialmente mortales, aunque de momento solo se aplican en contados hospitales.

La confusión de los médicos acerca de cuándo y cómo cambiar las prescripciones de los fármacos según los resultados de las pruebas, así como la falta de cobertura económica de los seguros médicos, impiden su uso generalizado.

SAM FALCONER

Dina Fine Maron es redactora de *Scientific American*.



Korei Parker, de siete años, es una niña activa y bulliciosa, con una sonrisa contagiosa, que improvisa sus propias canciones y se divierte compartiéndolas en alto. Un día de abril de 2014, Korei regresó a su casa, en Memphis, con unas lesiones extrañas. Se había dado un golpe con algo —quizá contra una mesa—, aunque no tan fuerte como para dejarle marcas profundas. Rhonda, su madre, solicitó una cita con su pediatra para esa misma semana. A la mañana siguiente, Korei se despertó con nuevas manchas en los brazos y la frente y, al lavarse los dientes, comenzaron a sangrarle las encías.

Madre e hija acudieron enseguida al Hospital de Investigación Pediátrico San Judas, cerca de donde viven. Los médicos le detectaron un fallo en la producción de nuevas células sanguíneas, lo que causa sangrados incontrolados, lesiones cutáneas e infecciones. La enfermedad se llama anemia aplásica adquirida grave.

Comenzaron por tratar a Korei con diversos fármacos para potenciar su producción de células sanguíneas y ayudarla a combatir las infecciones. Además, hicieron algo inusual: analizaron unos 230 genes de la niña y supieron así los fármacos y las dosis a los que respondería mejor. Algunas variantes genéticas llevan al organismo a descomponer ciertos medicamentos más deprisa y, en esos casos, incluso las dosis altas resultan ineficaces.

Las pruebas genéticas de Korei demostraron que su cuerpo degradaba con demasiada rapidez el voriconazol, un medicamento que le habían pautado para prevenir infecciones fúngicas. «Tomaba dosis de adultos y no parecían ejercerle efecto», explica Rhonda. Su hija no había sufrido aún ninguna infección fúngica grave, pero se mostraba vulnerable a ellas y su cuerpo no habría podido defenderse solo. Los médicos le recetaron otro fármaco que interacciona con enzimas producidas por genes diferentes. Su organismo logró procesarlo con normalidad y se mantuvo así libre de infecciones.

Adaptar los tratamientos al perfil genético de cada uno es la visión futurista de la medicina personalizada, en la que toda prescripción se ajusta al ADN de cada individuo. Este concepto revolucionario de emparejar fármacos con genes, llamado farmacogenómica, ya está aquí. Korei se benefició de ella. Aunque la secuenciación completa del genoma humano cuesta unos 1000 dólares, los estudios farmacogenómicos individuales de unos pocos centenares de genes cuestan la mitad en el Hospital San Judas. «La era de la medicina de precisión ha llegado», afirma Dan Roden, vicerrector adjunto de medicina personalizada en el Centro Médico de la Universidad Vanderbilt.

Por desgracia, solo unos pocos hospitales aprovechan las ventajas de la farmacogenómica. La falta de cobertura de las pruebas por parte de los seguros médicos de EE.UU. y la confusión entre los médicos sobre cómo manejar la información genética son las causas de que todavía no se esté empleando de forma generalizada.

Como consecuencia, hay personas que están enfermando sin necesidad, se lamentan los que defienden la estrategia. Se estima que entre un 5 y un 30 por ciento de la población presenta la misma variante genética que Korei, que no solo altera la respuesta al voriconazol, sino a otros muchos medicamentos. Según los análisis del Hospital San Judas y de la Universidad Vanderbilt, casi un 50 por ciento de los pacientes hospitalarios reciben a lo largo de un año un fármaco que les puede causar efectos adversos graves debido a su perfil genético. Un estudio realizado en Vanderbilt en el que se examinaron solo seis fármacos determinó que las pruebas farmacogenómicas podrían evitar hasta 400 acontecimientos adversos en una población de 52.942 pacientes. Si se aplicaran en toda la población estadounidense, el número de afecciones se reducirían en cientos de miles.

PALOS DE CIEGO

Los médicos no están acostumbrados a valorar aspectos genéticos a la hora de escoger un tratamiento médico. Lo que han hecho desde hace décadas es considerar factores muy fácilmente observables, como la edad y el peso del paciente, o su función renal o hepática. También tienen en cuenta si toma otros medicamentos y las preferencias personales que pueda tener.

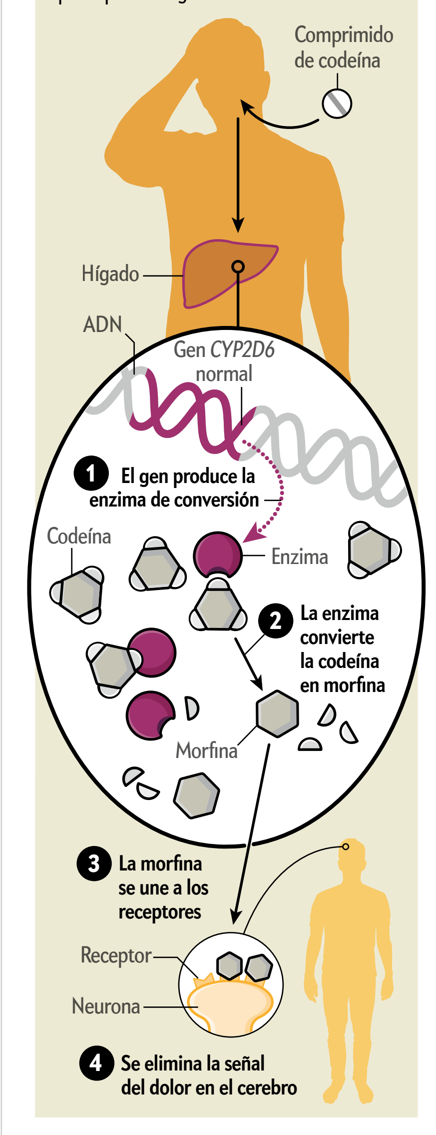
Si contaran con la información genética del paciente a la hora de prescribirle codeína, un analgésico común, les resulta-

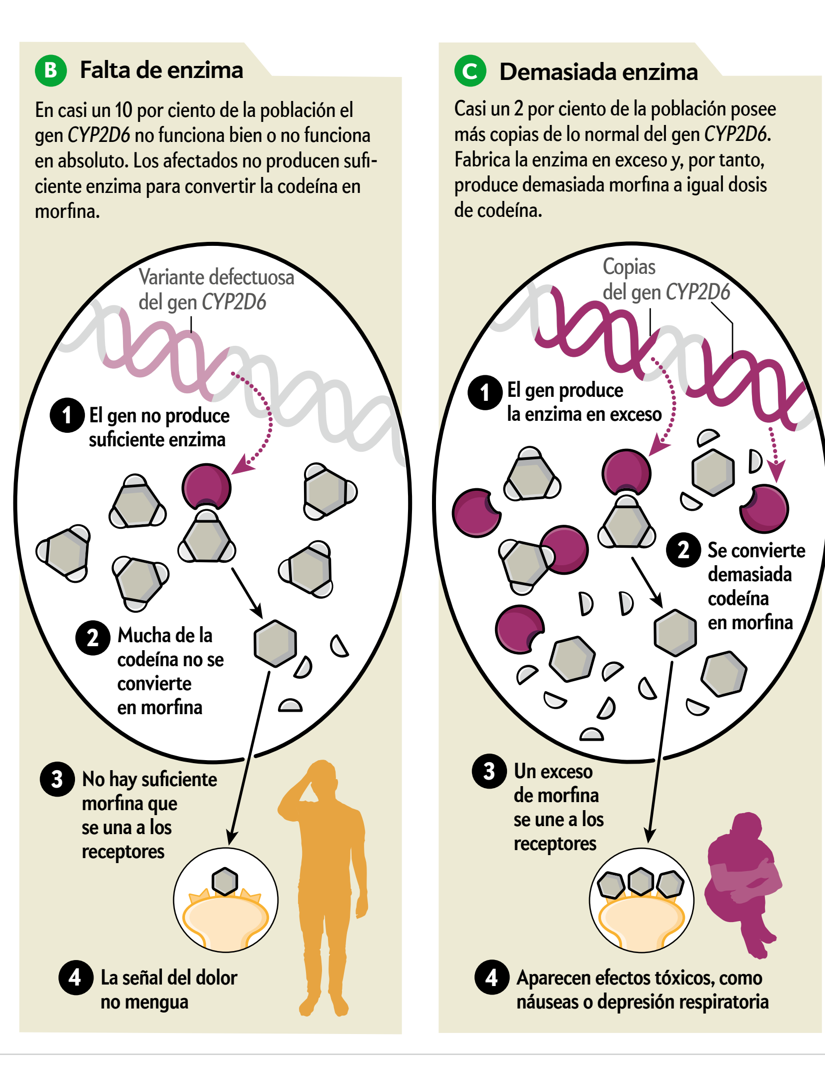
Tratamiento del dolor

Debido a ciertas diferencias genéticas, la codeína, un analgésico común, no funciona igual en todas las personas. Una enzima hepática es la encargada de convertir la codeína en morfina, el verdadero agente analgésico **A**. Pero algunas presentan una versión defectuosa de esta enzima **B** o no la producen en absoluto; y otras la fabrican en exceso **C**. Los estudios de ADN pueden aclarar estas alteraciones y los médicos pueden ajustar la dosis al perfil concreto del paciente.

A La cantidad justa de enzima

Un gen llamado *CYP2D6* codifica la enzima que ayuda a convertir la codeína en morfina. Cuando un paciente tiene dos copias normales del gen, produce la cantidad suficiente de esta enzima y, por tanto, también la de morfina. Esta se ancla a receptores celulares específicos del cerebro y de la médula espinal, con lo que impide la llegada de las señales de dolor.





TAMI TOLPA

ría muy útil. El organismo suele producir una enzima llamada CYP2D6 que metaboliza el fármaco y lo transforma en su forma activa, la morfina, la sustancia que alivia el dolor. Pero hasta un 10 por ciento de las personas poseen variantes genéticas que producen muy poca enzima, con lo que apenas convierten la codeína en morfina y, por consiguiente, no notan alivio alguno. El 2 por ciento de la población presenta el problema contrario. Cuentan con demasiadas copias de los genes que codifican esta enzima, de modo que la producen en exceso. En ellos, un poco de codeína se transforma en demasiada morfina, lo que puede provocar una sobredosis letal.

Las interacciones entre fármacos y genes pueden explicar enigmas médicos históricos. En el año 510 a.C., el matemático griego Pitágoras (referente clásico de la geometría) descubrió que algunas personas, al comer cierto tipo de judías, desarrollaban una anemia hemolítica (un cuadro potencialmente mortal en el que los glóbulos rojos son destruidos y eliminados del torrente sanguíneo). Dos mil quinientos años más tarde, se conoce el motivo: los afectados heredan una variante genética que causa una producción defectuosa de una enzima llamada glucosa-6-fosfato-deshidrogenasa (G6PD), una sustancia que evita precisamente la excesiva destrucción de los glóbulos rojos. Esta variante, que

puede detectarse en las pruebas genéticas hoy disponibles, también les predispone a sufrir crisis de anemia hemolítica cuando toman ciertos medicamentos, como la rasburicasa, administrada a menudo a pacientes con leucemia.

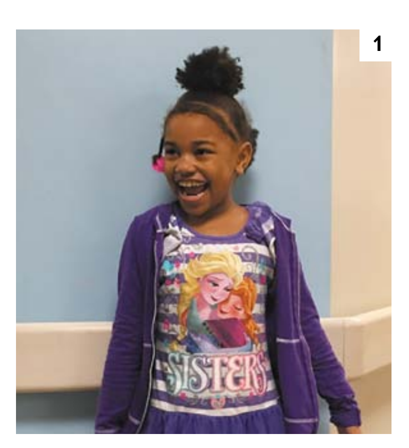
Muchas de estas interacciones indeseables, tanto las leves como las graves, podrían evitarse empleando dosis diferentes de los fármacos o sustituyendo estos por otros. Existen unos 80 medicamentos que interaccionan con unas dos docenas de genes para los que existen otras opciones terapéuticas, según un estudio publicado en *Nature* en octubre del 2015.

Algunos de los principales hitos científicos recientes se han fraguado en el Hospital San Judas, bajo la dirección de Mary Relling, en el departamento de ciencias farmacéuticas. En el hospital tratan a muchos pacientes pediátricos con cáncer y, puesto que numerosos medicamentos quimioterápicos pueden presentar tales problemas, los médicos temían que esos niños se vieran afectados por las interacciones genéticas. Relling y sus colaboradores realizaron estudios farmacogenómicos a pequeña escala durante años. En mayo de 2011, dieron el salto y comenzaron a hacer las pruebas a todos los pacientes del hospital.

Gracias a la financiación derivada de donaciones y becas, el hospital cuenta con una ventaja enorme frente a otros: puede despreocuparse de que las aseguradoras reintegren al centro el coste de las pruebas genéticas o de que denieguen la petición y obliguen al paciente a cubrir el gasto. Así, cuando un paciente ingresa en el Hospital San Judas, se le realiza un análisis sanguíneo de más de 200 genes.

El pasado marzo el hospital incluía, en la historia clínica electrónica de casi 3000 pacientes, los datos correspondientes a 7 genes y 23 fármacos cuyos efectos han sido bien estudiados. Una de esas historias es la de Eden Brewer, una niña de cinco años diagnosticada de una leucemia linfoblástica aguda el año pasado. Por fortuna, en su caso no se encontró ninguna mutación genética que exigiera cambiar su plan terapéutico. Pero sí se detectó que podría tener problemas con otros fármacos más adelante. Es el caso de la simvastatina, un medicamento empleado en el control de la hipercolesterolemia. Eden posee una variante de un gen, conocido como *SLC01B1*, que le impide metabolizar adecuadamente este fármaco. Por motivos aún desconocidos, ello podría causarle un daño muscular potencialmente mortal. La simvastatina es un fármaco recetado con frecuencia, pero Eden debe abstenerse de usarla.

«Es emocionante disponer de este tipo de información», comenta su madre, Nicole. «Nos resulta útil no solo durante nuestra estancia en el hospital, sino para el resto de su vida.» Si alguna vez un médico del hospital intenta prescribir este fármaco, le saltará un mensaje de aviso en su historia clínica.





LAS PRUEBAS GENÉTICAS ayudaron a los médicos a decidir qué fármacos prescribir a Korei Parker (*1*) en el Hospital de Investigación Pediátrico San Judas. Eden Brewer, paciente del mismo hospital, y su doctor, también sacaron provecho de estas pruebas (*2*).

DINA FINE MARON

ADVERTENCIA A TIEMPO

El Centro Médico de la Universidad Vanderbilt es otra de las instituciones del país que se sirve de la farmacogenómica para ayudar a sus pacientes. Roden, jefe de la sección de medicina personalizada, recuerda el caso de la primera paciente que se benefició de ella, en 2010. La mujer, de 68 años, había acudido a Vanderbilt para ser atendida tras haber recibido un trasplante cardíaco. Su médico le implantó un estent para permeabilizar un vaso sanguíneo colapsado. A continuación quiso pautarle clopidogrel, un fármaco que suele emplearse para prevenir trombos. Cuando intentó introducir la medicación en su historia clínica electrónica, le saltó un aviso en la pantalla del ordenador. Le informaba que las pruebas genéticas de la paciente indicaban que no metabolizaría bien el fármaco. El aviso formaba parte de los primeros esfuerzos de Vanderbilt por introducir la farmacogenómica en el centro. Ofrecía como alternativa el fármaco prasurgrel, cuya acción no se vería afectada por esos genes.

Seis años más tarde, Vanderbilt sigue fijando su atención en pacientes con cardiopatías porque ha descrito varias interacciones genéticas con medicamentos cardiovasculares. Según uno de sus estudios, con más de 9500 pacientes, el 91 por ciento de ellos presentaba al menos una alteración genética que haría cambiar a los médicos la dosis o la pauta de la medicación. De estos, cerca de un 5 por ciento tenía dos copias de genes que les predisponían a sufrir infartos cerebrales o de miocardio derivados de un trombo si empleaban dichos fármacos a las dosis habituales.

Al igual que el Hospital San Judas, Vanderbilt ha respaldado el gasto de estos estudios a causa de los problemas con las aseguradoras. Estas solo asumen el gasto de algunas pruebas porque refieren que no todas han demostrado mejorar de forma notable los resultados clínicos. «La cobertura de estos estudios varía debido a los limitados datos científicos sobre su efectividad para los pacientes», apunta Clare Krusing, portavoz de Planes de Seguros de Salud de Estados Unidos, asociación gremial nacional del sector asegurador.

Por fortuna, este escepticismo está mostrando signos de atenuarse. En los últimos años, algunas aseguradoras han comenzado a modificar sus políticas de reembolso y ya están cubriendo un pequeño porcentaje del coste, según fuentes de Vanderbilt. Otros hospitales están tomando nota. El Centro Médico de la Universidad de Maryland empezó a ofrecer estos análisis solo unos años después de que lo hiciera Vanderbilt, si bien únicamente a pacientes con enfermedades cardiovasculares. Han empleado becas de investigación científica del Gobierno para sufragar los costes de más de 600 pacientes. Pero esperan poder tener pronto cobertura por parte de las aseguradoras, según Amber Beitelshees, una de las coordinadoras del proyecto de Maryland.

En la actualidad, solo diez hospitales ofrecen estudios de farmacogenómica, entre ellos los de Maryland, Vanderbilt y San Judas. Además del aspecto económico, el desconocimiento médico sigue obstaculizando su uso generalizado. Muchos doctores han sido educados en la época anterior a estos análisis, de modo que ni se plantean emplearlos. Y es muy posible que, aunque lo hicieran, estarían poco preparados para entender los resultados y aplicarlos. «Además de los datos brutos, necesitamos las herramientas informáticas adecuadas y sistemas para la toma de decisiones», afirma Roden. Hay que informar al médico que su paciente se ha sometido a pruebas genéticas para ciertas variantes y cuáles han sido los resultados, y también debe recibir indicaciones sencillas acerca de los cambios que conviene hacer en su prescripción.

En el servicio de farmacia del Hospital San Judas trabajan para comunicar a los médicos los posibles medicamentos alternativos. Además, se han creado hojas informativas sobre el significado de algunas variantes genéticas concretas, hojas que se entregan a los pacientes con los resultados de todas las pruebas.

Otro aspecto crucial es la precisión de estos estudios. La Agencia Federal de Fármacos y Alimentos de EE.UU. (FDA) ha comenzado a regular los análisis genéticos que se ofrecen directamente al consumidor. En 2013 por ejemplo, ordenó que la compañía 23andMe retirase el kit de genoma personal, su producto estrella, puesto que no había pruebas de que ofreciese resultados precisos. El vacío dejado por este producto se ha ido rellenando con nuevas opciones basadas en la farmacogenómica. La compañía DNA4life comenzó a vender, por 249 dólares, una prueba de ADN para predecir la respuesta a ciertos fármacos. Pero en noviembre del año pasado, la FDA le mandó una dura carta en la que le indicaba que necesitaba una autorización de comercialización para seguir vendiéndola al público o, en su defecto, explicara con detalle por qué la agencia debería considerarla exenta de ese trámite. La FDA informa que no puede hacer declaraciones acerca de las conversaciones en marcha con esta compañía. En términos generales, afirma que mantiene una vigilancia estrecha sobre estas pruebas porque hay un riesgo potencial de que los pacientes sean engañados o, peor aún, reciban información errónea que pudiera causarles daño.

La FDA sin embargo, no vigila los estudios intrahospitalarios que se llevan a cabo en la actualidad, como los del Hospital San Judas. Cuando en los años setenta surgieron las primeras normas para regular los análisis realizados en los hospitales, esas pruebas diagnósticas eran bastante sencillas y parecía razonable que se desarrollaran en laboratorios con certificación federal. Pero ahora que han adquirido mayor complejidad, y debido a su uso cada vez más frecuente, la FDA está considerando intervenir y supervisar de cerca estas pruebas, aunque de momento no hay una fecha prevista para comenzar.

La situación parece que va cambiando de forma gradual, al igual que con las compañías aseguradoras. Relling codirige un grupo de investigación, financiado con fondos de los Institutos Nacionales de Salud de EE.UU., para documentar con detalle cualquier nueva interacción entre genes y fármacos respaldada por datos científicos sólidos. De este modo, establecen guías estandarizadas con información sobre qué genes deben estudiarse y con recomendaciones de cambios en el tratamiento según los resultados obtenidos. Se pretende entregar estas guías a los laboratorios de otros hospitales.

Un médico intentó prescribir a una mujer clopidogrel, un fármaco empleado para prevenir trombos. Cuando tecleó la medicación en su historia clínica electrónica, le saltó un aviso. Le informaba que las pruebas genéticas indicaban que metabolizaría mal ese fármaco

A medida que vayan realizándose más estudios y demostrándose los beneficios para los pacientes, los expertos confían en que los obstáculos y la resistencia actual vayan mermando y terminen por desaparecer. Cuando los médicos conozcan los problemas derivados de las interacciones genéticas no querrán prescribir ciertos fármacos sin estos análisis, lo que forzará la demanda a las instituciones para llevarlos a cabo, según Relling. «Si dispusiéramos de esta información genética y no la aprovecháramos, no estaríamos haciendo una buena praxis médica.» MyC

PARA SABER MÁS

Optimizing drug outcomes through pharmacogenetics: A case for preemptive genotyping. J. S. Schildcrout et al. en *Clinical Pharmacology & Therapeutics*, vol. 92, n.º 2, págs. 235-242, agosto de 2012.

Preemptive clinical pharmacogenetics implementation: Current programs in five US medical centers. Henry M. Dunnenberger et al. en *Annual Review of Pharmacology and Toxicology*, vol. 55, págs. 89-106, enero de 2015.

Pharmacogenomics in the clinic. Mary V. Relling y William E. Evans en *Nature*, vol. 526, págs. 343-350, 15 de octubre de 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

Nueva medicina para la psique. Christian Wolf en *MyC* n.º 56, 2012.



EL PERÍODO DE TIEMPO de una vida humana es suficiente para seleccionar los rasgos que han convertido a los zorros de salvajes en domésticos.

GENÉTICA

ZORROS CONVERTIDOS EN PERROS

Un audaz experimento realizado en Siberia reproduce de modo acelerado la evolución del perro para comprobar hipótesis sobre su domesticación

Lyudmila Trut y Lee Alan Dugatkin

El animal corrió hacía mí agitando su cola curvada y dirigiéndome una mirada rebosante de alegría. Saltó a mis brazos y me lamió el rostro, como un perro. Pero no se trataba de un perro, sino de un zorro, aunque se asemejaba y se comportaba como el mejor amigo del hombre. Este ejemplar y sus parientes cercanos son el fruto de 58 generaciones de cría selectiva, practicada con la pretensión de revelar los secretos de la domesticación y, en concreto, del modo en que el lobo se transformó en perro por mediación humana.

Lyudmila Trut es genetista evolutiva y profesora del Instituto de Citología y Genética en Novosibirsk, donde el experimento sobre la domesticación del zorro sigue su curso. Desde 1959 ha sido una de las protagonistas de esta historia, narrada en primera persona.

Lee Alan Dugatkin ejerce como etoecólogo e historiador de la ciencia en la Universidad de Louisville, Kentucky. Durante los últimos seis años ha estado colaborando con Trut en un libro sobre la domesticación del zorro.


1

Tengo 83 años. Cuando dirijo la vista atrás y rememoro el experimento al que he dedicado sesenta años de mi vida, a veces mis divagaciones me llevan hasta el clásico relato de *El Principito*, de Antoine de Saint-Exupéry, en el momento en que el zorro hace la siguiente advertencia al protagonista: «Eres responsable para siempre de lo que has domesticado».

He sido la responsable de esos zorros desde poco después de mi primera charla con quien fuera mi tutor y amigo, Dmitri Belyaev, en 1958. Por entonces estaba finalizando mis estudios en la Universidad Estatal de Moscú, cuando supe que Belyaev la abandonaba para incorporarse al recién fundado Instituto de Citología y Genética, en Novosibirsk, y que andaba buscando estudiantes para que participaran en un experimento de domesticación que estaba a punto de emprender.

Me sorprendió que en nuestro primer encuentro me tratara, a mí, una simple estudiante, como una colega más. Me explicó el objetivo básico de la investigación, no otro que el estudio del proceso de domesticación en condiciones aceleradas: «Pretendo hacer de un zorro un perro», me explicó. En cada generación seleccionaríamos los raposos que mostraran la mejor predisposición al contacto con las personas. Si todo seguía el curso previsto, la domesticación, quizá de modo similar a la transformación que convirtió al lobo en perro, se desplegaría ante nuestros ojos.

Cuando abandoné aquel despacho, ya había tomado una decisión, lo que significaba mudarme a Novosibirsk, la mayor ciudad de Siberia. Me entusiasmó tanto la idea de formar parte de la primera generación de investigadores de la flamante ciudad de las ciencias de Akademgorodok, donde se hallaba el joven instituto, como la perspectiva de poder trabajar con aquel hombre, de quien tuve el presentimiento que era un visionario. Poco después, acompañada de mi esposo y mi pequeña hija, tomaba el ferrocarril que unía la capital con mi nuevo remoto destino.

La hipótesis de Belyaev sobre el proceso de domesticación animal resultaba radical a la par que simple. Había llegado a

EN SÍNTESIS

El lobo se convirtió en perro hace solo unos milenios. El hombre desempeñó un claro papel en esa especiación, pero los pormenores de la historia se han perdido.

Un experimento realizado en Siberia durante sesenta años ha intentado reproducir el proceso evolutivo que transformó el lobo en perro. En el trabajo, otro cánido, el zorro común, fue seleccionado a lo largo de docenas de generaciones en virtud de su docilidad.

Al cabo de pocas generaciones, nacieron zorros que se mostraban mansos y presentaban rasgos fisonómicos asociados a la domesticación, como el pelo moteado y la cola curvada.

PÁGINAS ANTERIORES Y ESTA PÁGINA: VINCENT J. MUSI, *NATIONAL GEOGRAPHIC*





ZORROS E INVESTIGADORES posan juntos en el centro de investigación de Siberia (*1 y 2*). La autora Lyudmila Trut cuida a Penka, hijo de Pushinka, en 1974, cuando los tres vivían bajo el mismo techo (*3*).

VINCENT J. MUSI, *NATIONAL GEOGRAPHIC* (2); CORTESÍA DE LYUDMILA TRUT E INSTITUTO DE CITOLOGÍA Y GENÉTICA (3)

la conclusión de que la característica distintiva de todo animal domesticado era la docilidad. Por consiguiente, desde la perspectiva evolutiva, la domesticación fue iniciada por nuestros ancestros al favorecer a los ejemplares menos temerosos y agresivos. La mansedumbre fue la clave para hibridar unos individuos con otros en busca de los demás caracteres deseados. Nuestros perros, vacas, caballos, cabras, ovejas, cerdos y gatos tenían que ser dóciles, tanto si se pretendía destinarlos a labores de guarda, a obtener de ellos leche o carne, servir de compañía, o cualesquier otro bien o cualidad.

No solo eso. Belyaev pensaba que la mayoría de los otros atributos propios de los animales domesticados, si no todos, lo que ahora denominamos el síndrome de la domesticación —colas curvadas, orejas caídas, pelaje moteado, conservación de las facciones juveniles en la edad adulta (redondez de formas y hocico chato) y menor estacionalidad en el celo— eran el subproducto de la selección de los animales más mansos. Y así, una generación tras otra, bajo la supervisión de Belyaev, pero también con una buena dosis de autonomía en las cuestiones experimentales del día a día, llevé a cabo una cría selectiva de los zorros más dóciles que hallé en granjas peleteras de toda la Unión Soviética.

LOS SELECTOS

Cada año sometí cientos de ellos a pruebas preliminares con un método concebido por nosotros. Con las manos enfundadas en manoplas de dos dedos de grosor, me acercaba a la jaula del probando, me detenía ante ella, abría la trampilla e introducía una vara en su interior. Evaluaba su reacción en una escala que otorgaba la puntuación más alta a los individuos más tranquilos.

Durante los primeros años casi todos se comportaron como auténticas fieras, nada remotamente parecido a un perro: cuando me acercaba a la jaula o introducía en ella la vara reaccionaban con gran agresividad. No tengo la menor duda de que los más agresivos me habrían arrancado la mano sin contemplaciones. Otros de los que obtenían puntuaciones bajas se agazapaban asustados en el fondo de la jaula. Pero un puñado de ellos permanecían tranquilos durante la prueba, atentos pero sin reaccionar de esa guisa: fueron los elegidos para engendrar la generación siguiente mediante su cruce. Mantuve registros minuciosos durante todo su desarrollo, desde el nacimiento hasta la madurez. Y tuvimos especial cuidado en evitar la consanguinidad derivada del cruce de los individuos estrechamente emparentados; esperábamos eludir así sus consecuencias negativas como factor de confusión en el experimento.

Ninguno de aquellos zorros serenos de las primeras generaciones destacaba precisamente por su sociabilidad hacia las personas; toleraban nuestra presencia, pero no parecían disfrutar con ella. Sin embargo, en las generaciones cuarta y quinta tuve un anticipo alentador de lo que estaba por llegar: cachorros de pocos días, a duras penas capaces de caminar, comenzaron a agitar la cola cuando me acercaba.

Y después llegó la sexta generación, cuyos resultados describimos en un artículo publicado en 2009 en la revista *Bioessays*: «En la sexta generación nacieron cachorros que buscaban ansiosamente el contacto con las personas; no solo meneaban el rabo, sino que proferían gimoteos y lloros y lamían como un perro». La exhibición de esa variedad de comportamientos nos causó tal sorpresa que apodamos a los ejemplares «los selectos». Los pequeños zorros incluso prestaban atención cuando oían su nombre. Parecía como si «añoraran la compañía humana», tal como señalamos en nuestra aportación a la segunda edición del libro *The genetics of the dog* [«La genética del perro»], en 2012. Los cachorros también respondieron a los sonidos dos días antes y abrieron los ojos tres días antes de lo que es habitual en su especie, casi como si se estuvieran preparando para comenzar a relacionarse con la gente lo antes posible.

No había nadie que no sucumbiera al encanto de los ejemplares selectos, incluso los caracteres más adustos. Una tarde, acabada la jornada laboral, Belyaev llegó a las instalaciones acompañado por un destacado general del ejército, un tal Lukov. Era uno de esos tipos severos, endurecidos por los horrores de la guerra. Pero cuando abrí la jaula de una de las hembras selectas y salió corriendo hacia mí y se tumbó a mi lado, el semblante grave del general se desvaneció. Asombrado, se acercó a ella, se acuclilló y le acarició la cabeza durante un buen rato.

En esa sexta generación, los individuos selectos apenas constituían el 2 por ciento de los amansados, pero la cifra no cesó de crecer con cada generación. Hoy ya rondan el 70 por ciento.

TRASPLANTES DE FETOS

Para Belyaev y para mí, genetistas de formación, cualquier experimento relacionado con la domesticación representaba una investigación de genética evolutiva. Necesitábamos tener la certeza de que los cambios que contemplábamos en los zorros eran de origen genético. Con ese propósito, concebimos una prueba con los especímenes mansos y otro grupo experimental de animales que habíamos seleccionado por su agresividad. Las sucesivas generaciones de cría selectiva habían dado lugar al equivalente vulpino del cancerbero, el perro policéfalo que guardaba la entrada al inframundo de Hades. Eran zorros realmente fieros.

Quisimos implantar embriones de las madres dóciles en el útero de las hembras agresivas, y viceversa. Si los neonatos se comportaban como la madre biológica y no como la subrogada, podríamos confiar en que la docilidad y la agresividad eran básicamente genéticas.

Cada trasplante implicaba a una pareja de hembras, una dócil y otra agresiva, ambas en la primera semana de gestación. Una vez anestesiadas, practicaba una incisión en el abdomen de una de ellas y palpaba el útero, con sus trompas derecha e izquierda, cada una de las cuales acogía ya embriones implantados. Acto seguido extraía los embriones de una trompa de la donante y los depositaba con cuidado en líquido nutritivo. A continuación repetía la misma operación y extraía los embriones de una de las trompas de la hembra receptora, pero esta vez los sustituía por los de la donante. En una parte de los trasplantes, la donante era dócil y la receptora agresiva. En los demás, los papeles se intercambiaban.

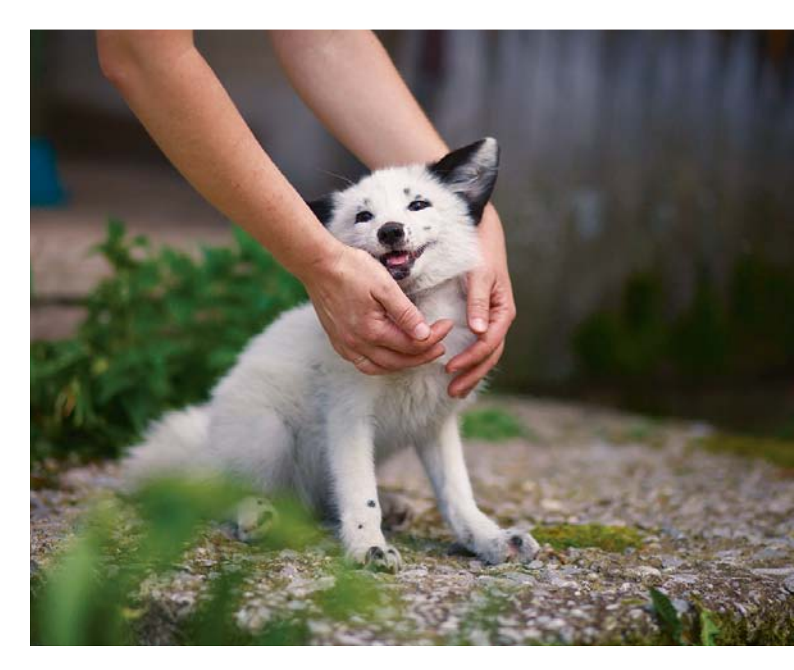
Pero ¿cómo lograríamos distinguir los hijos naturales de los trasplantados, cuando nacieran los cachorros al cabo de siete semanas? Los propios zorros aportaron la solución: el color de la capa es en ellos un carácter genético definido, por lo que, gracias al registro del color de sus progenitores, sería posible deducir la ascendencia del cachorro a partir de su pelaje.

Junto con mi íntima amiga y colega Tamara Kuzhutova, tomamos nota del comportamiento de los cachorros en cuanto comenzaron a entrar en contacto con humanos. Recuerdo sobre todo una hembra agresiva y su camada, una parte de la cual era mansa. Desde que apenas se sostenían en pie, aquellos retoños dóciles corrían en tropel hasta la trampilla de la jaula meneando el rabo cuando veían a alguno de nosotros cerca. Ese comportamiento impropio parecía irritar a su madre, que les gruñía, los agarraba por el cuello y los llevaba de vuelta al cubil.

En la misma camada, la descendencia natural de la madre agresiva se comportaba como era de esperar: gruñían y huían de inmediato hacia el cubil. Constatamos esas mismas actitudes una y otra vez. Los cachorros se comportaban como sus madres naturales, no como sus madres subrogadas. La docilidad y la agresividad hacia los humanos parecían corresponder, pues, a rasgos genéticos que se heredaban.

PUSHINKA

En 1974 el experimento ya contaba con 15 generaciones. Muchos zorros mansos pertenecían a la categoría selecta y comenzamos a ver diversos atributos propios de otras especies domesticadas, como Belyaev había predicho. Sus rostros habían adquirido una fisonomía más juvenil, sus colas eran más pobladas, presentaban niveles inferiores de las hormonas del estrés y su ciclo reproductor era más dilatado. Unos pocos, entre ellos uno de mis favoritos, Mechta («Sueño»), tenían las orejas caídas.



A LOS CACHORROS DOMESTICADOS les agrada el contacto con los humanos. El hocico chato y el pelaje moteado los diferencian de sus ancestros.

CORTESÍA DE LYUDMILA TRUT E INSTITUTO DE CITOLOGÍA Y GENÉTICA

La mayoría de las especies domesticadas no entablan lazos estrechos con ninguna persona en particular, pero el perro es un caso aparte. ¿Pudo ser esta afinidad emocional hacia los humanos un cambio surgido con rapidez, como tantos otros que habíamos observado en los zorros? ¿Y se desarrollaría con naturalidad en los zorros que habíamos amansado? En busca de respuestas, le propuse a Belyaev que usáramos nuestros zorros para examinar los profundos lazos emocionales interespecíficos que traban hombre y perro.

En la granja en la que llevábamos a cabo el experimento había una casa pequeña. Me ofrecí a mudarme a ella con uno de los zorros selectos para ver qué vínculos podrían surgir entre nosotros. Belyaev aplaudió la idea. Así que, el 28 de marzo de 1974, me mudé con Pushinka («Bolita de pelo») al nuevo hogar.

Pushinka tenía los ojos negros como el azabache, el pelaje de ese mismo color en la base pero rematado en puntas grises y una franja blanca en la mejilla izquierda. Acababa de cumplir su primer año y estaba preñada; le faltaban una o dos semanas para parir. Así que no solo podría observar cómo se adaptaba a la convivencia conmigo, sino también si los cachorros nacidos en compañía de humanos socializarían de modo distinto a los otros, incluso a otros selectos.

El nuevo hogar tenía cocina, baño y tres habitaciones. Me reservé una como despacho y dormitorio y en otra construí una madriguera para ella. La tercera serviría como espacio común, con un par de sillas y una mesa. Pushinka podría deambular libremente por toda la casa. Para que pudiera dedicar algo de tiempo a mi familia humana, Kuzhutova y otros colegas me relevaban algunos días. Quienquiera que estuviera de turno tomaba minuciosas anotaciones en mi diario sobre los aspectos más variopintos del comportamiento de Pushinka a lo largo del día y de la noche.

Los primeros días fueron como un trayecto en montaña rusa. A su llegada correteó por toda la casa, frenética y muy nerviosa. No probó bocado hasta que le ofrecí un pedazo de queso y una manzana que reservaba para mí. La situación mejoró el segundo día. Cuando regresé después de ausentarme brevemente, me aguardaba en la puerta de casa, como un perro. Pero sus altibajos no cesaron aquí. A veces mi nueva amiga se inquietaba tanto que parecía al borde de una crisis nerviosa; en cambio, al día siguiente saltaba a la cama para acurrucarse a mi lado como si nada hubiera pasado.

La adaptación resultó más dura de lo que había supuesto, pero al cabo de una semana, más o menos, Pushinka parecía haberse acomodado a la nueva situación. Se tumbaba a mis pies mientras trabajaba en el escritorio. Parecía disfrutar de los paseos conmigo. Uno de sus pasatiempos favoritos consistía en buscar y arrebatarme una golosina que yo me escondía en el bolsillo. A veces se tumbaba panza arriba, invitándome a acariciarla.

El 6 de abril dio a luz a seis cachorros. Y, para mi sorpresa, tomó uno y lo depositó a mis pies. Recuerdo que le dije: «¡Debería darte vergüenza! ¡Se va a resfriar!». Pero cuando lo devolví a la madriguera, Pushinka volvió a mostrármelo. Siguió un tira y afloja antes de que me diera por vencida y lo dejase fuera de su guarida.

Puse nombre a los cachorros. Todos comenzaban por la letra P en honor a su madre: Prelest («Preciosa»), Pesnya («Canción»), Plaksa («Llorona»), Palma («Palmera»), Penka («Piel lechosa») y Pushok (la versión masculina de «Bolita de pelo»). Al cabo de un par de semanas la camada entera salía corriendo del cubil cuando yo entraba en la habitación.

Cada uno tenía su personalidad: a Pushok le gustaba llamar la atención, a Palma le encantaba saltar a la mesa, Pesnya era serena, estoica, Prelest a veces se mostraba bravucona con sus hermanos, Plaksa murmuraba mientras caminaba, y Penka, mi favorita, era una dormilona.

Pese a la afirmación de León Tolstói de que «todas las familias felices son muy parecidas», Pushinka y su camada eran una familia feliz pero única. Jugaba a la pelota con todos o corría por la casa perseguida por ellos. A Penka le gustaba mucho esta actividad: saltaba sobre mi espalda cuando me atrapaba. Los paseos alborotados acababan agotándolos. Una anotación de mi diario los describe «durmiendo, sin preocupaciones ni temor».

A medida que la camada crecía y Pushinka dedicaba menos tiempo a su cuidado, los lazos entre nosotras dos se estrecharon. Le gustaba yacer a mis pies esperando que le rascara el cuello. Si salía de casa un momento, a veces se sentaba ante la ventana, aguardando mi regreso. Y cuando me veía llegar, iba hacia la puerta agitando el rabo.

A pesar de todas esas muestras de nuestro vínculo, lo que sucedió la tarde del 15 de julio de 1974 me pilló por sorpresa. Estaba leyendo un libro en el banco de la entrada, como solía hacer a menudo, mientras Pushinka descansaba a mis pies. Escuché pasos a lo lejos, pero no presté más atención. Pushinka, en cambio, presintió un peligro. Pero en lugar de huir o buscar mi amparo, salió corriendo en pos del intruso e hizo algo que jamás había hecho y que jamás volvería a hacer: ladró con fuerza, exactamente como lo haría un perro guardián.

Jamás había mostrado esa agresividad, menos aún fiereza, ante ningún ser humano. La seguí y vi que el motivo de su temor era el guarda nocturno que vigilaba las instalaciones. Comencé a conversar con él sosegadamente. Pushinka intuyó que no pasaba nada y dejó de ladrar.

Hacía tres meses y medio que nos habíamos trasladado a aquella casa para comprobar si la convivencia con un ser humano conllevaría una fidelidad canina en los zorros selectos, que ya eran el fruto de casi 15 años de selección genética. Creo que aquella noche obtuvimos la respuesta decisiva.

HASTA EL MISMO ADN

Pushinka murió hace tiempo. Pero el experimento y mi participación en él continúan hoy. Cuarenta y tres generaciones la han sucedido. (Tal cifra de generaciones en los humanos nos remontaría a la Alta Edad Media.) Los descendientes de Pushinka y de sus congéneres amansados han aportado numerosos datos y pistas acerca del proceso de la domesticación, bosquejado en nuestro libro *How to tame a fox (and build a dog)* [«Cómo domesticar un zorro (y hacer de él un perro)»], pero basta decir que los actuales zorros mansos son aún más sociables y afectuosos. Siguen la mirada y los gestos humanos, y su aspecto recuerda aún más al de un perro, con un hocico más chato y más paticortos.

Gracias a los avances de la genética, durante los últimos años nuestro equipo ha logrado explorar el proceso de domesticación en el propio ADN. Muchas regiones cromosómicas implicadas en el cambio genético relacionado con el singular comportamiento y morfología de los zorros dóciles, aunque sin duda no todas, han sido ubicadas en el cromosoma 12. En concreto, en ese cromosoma descubrimos varios locus de caracteres cuantitativos (QTL, por sus siglas en inglés), esto es, segmentos de ADN asociados a genes que rigen caracteres que varían de forma continua y que están ligados con la docilidad. (En la especie humana, la estatura y el color de la piel son ejemplos de caracteres asociados a este tipo de locus.)

Al comparar esas secuencias de ADN con lo que sabíamos acerca de la genética de la domesticación canina, junto con Anna Kukekova y otros colegas comprobamos que con frecuencia los QTL del cromosoma 12 del zorro eran similares a los QTL involucrados en la domesticación del perro. Así pues, llegamos a la conclusión de que, con los cruces selectivos efectuados a lo largo de docenas de generaciones, habíamos recreado vagamente, a escala genética, la transformación de un cánido salvaje en un animal de compañía.

Los zorros están comenzando casi literalmente a contarnos cosas. Cuando junto con Svetlana Gogoleva comparamos las vocalizaciones de los raposos mansos y los agresivos, descubrimos que los sonidos proferidos por los primeros eran únicos. La dinámica acústica de su vocalización recuerda notablemente a la risa humana. Ignoramos de qué modo y con qué fin «ríen» los zorros mansos, pero resulta difícil de concebir una forma más agradable de forjar lazos con otra especie.

PARA SABER MÁS

Animal evolution during domestication: The domesticated fox as a model. Lyudmila Trut et al. en *Bioessays*, vol. 31, n.º 3, págs. 349-360, marzo de 2009.

How to tame a fox (and build a dog): Visionary scientists and a Siberian tale of jump-started evolution. Lee Alan Dugatkin y Lyudmila Trut. University of Chicago Press, 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

Domesticación del perro. Relaciones entre perro y lobo. Carles Vilà en *IyC*, marzo de 1999.

Del lobo al perro. Virginia Morell en *IyC*, septiembre de 2015.

por Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik

Jean-Michel Courty y **Édouard Kierlik** son profesores de física en la Universidad Pierre y Marie Curie de París.



Cuando el calor se convierte en electricidad

En un conductor, el transporte de energía se halla vinculado al movimiento de las cargas eléctricas. A ello se debe el efecto Seebeck, por el que una diferencia de temperaturas genera una corriente eléctrica

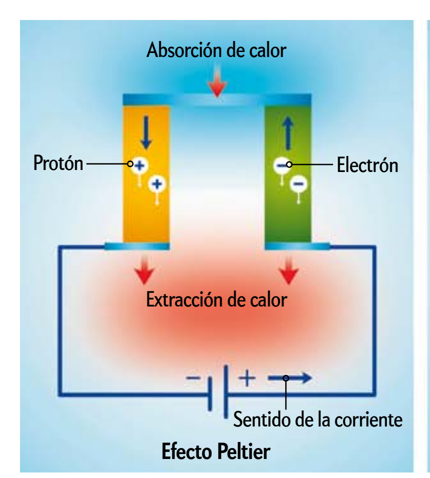
Estamos en 2013, en la final de la Google Science Fair, el concurso internacional de ciencia y tecnología para jóvenes de entre 13 y 18 años. Ann Makosinski, una canadiense de 16 años, recibe un premio por haber inventado una linterna de bolsillo que se alimenta exclusivamente con el calor de la palma de la mano. El núcleo del dispositivo lo constituyen unos módulos termoeléctricos que permiten generar calor a partir de una diferencia de temperaturas; en este caso, la que existe entre la piel y el aire ambiente. ¿Cómo operan estos dispositivos?

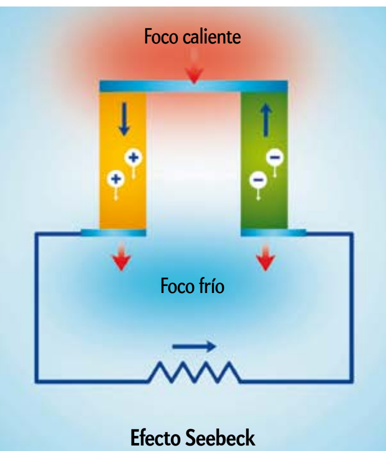
En 1834, el físico francés Jean Charles Peltier describió un sorprendente efecto que asociaba electricidad y calor y que desde entonces lleva su nombre. Cuando una corriente eléctrica atraviesa una soldadura entre dos metales diferentes, esta absorberá o desprenderá calor en función del sentido de la corriente. En tal caso, la potencia térmica absorbida o cedida resulta ser proporcional a la intensidad de la corriente. El efecto Peltier difiere así del efecto Joule, en el que la potencia térmica disipada es proporcional al cuadrado de la intensidad.

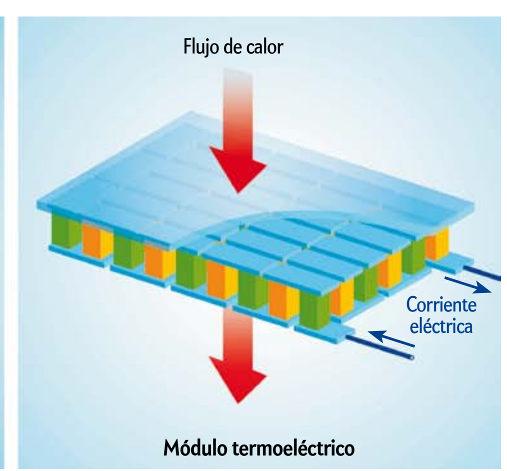
El efecto Peltier permite construir máquinas térmicas muy fiables, sin piezas móviles ni pérdidas de fluido. Basta con montar un circuito eléctrico cerrado en el que se sucedan un hilo de un metal *A,* otro de un metal *B*, uno más del metal *A* y una fuente de tensión. Cuando circula la corriente, una soldadura se calienta y la otra se enfría. Sin embargo, dado que el flujo térmico es limitado, el uso de estos módulos basados en el efecto Peltier ha quedado relegado a aplicaciones muy concretas, como la refrigeración.

Electrones y temperatura

¿A qué se debe el efecto Peltier? En un metal, los electrones llamados «de conducción» pueden moverse con libertad, lo que hace posible que circule una corriente eléctrica. A poca temperatura, los electrones van ocupando sucesivamente todos los niveles de energía disponibles a partir del más bajo. La energía máxima alcanzada, conocida como «energía de Fermi», depende del material. Pero ¿qué ocurre cuando ponemos en contacto dos metales diferentes? Al hacerlo, los electrones pasan del metal con niveles de energía más elevados a aquel en el que estos son menores. Esa transferencia de cargas continúa hasta que los dos niveles más altos

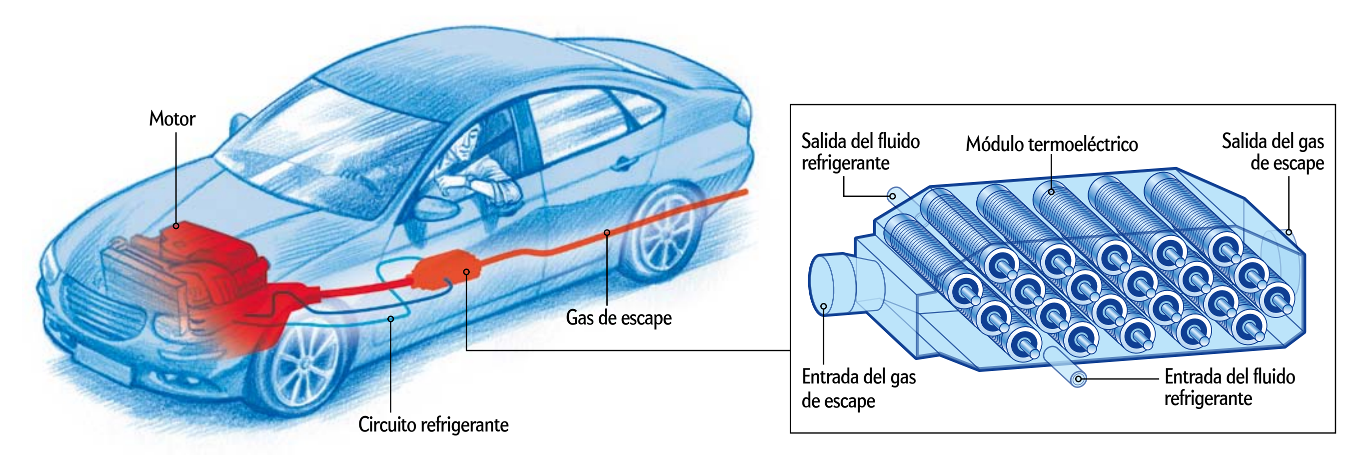






ILUSTRACIONES DE BRUNO VACARO

EL EFECTO PELTIER PUEDE EMPLEARSE A MODO DE REFRIGERANTE (*izquierda*): Atravesada por una corriente eléctrica, la junta entre dos varillas hechas de semiconductores diferentes absorbe calor, el cual es evacuado por los extremos de las varillas. El efecto Seebeck, su inverso, permite generar una corriente eléctrica a partir de dos focos térmicos a diferente temperatura (*centro*). Al agrupar un gran número de circuitos iguales, se construyen módulos termoeléctricos que funcionan según un principio u otro (*derecha*).



ALGUNOS FABRICANTES DE AUTOMÓVILES investigan cómo recuperar el calor del gas de escape para generar energía eléctrica. Uno de los dispositivos propuestos emplea módulos termoeléctricos cilíndricos. La pared exterior de estos se halla en contacto con el gas caliente, mientras que por el eje central circula un fluido refrigerante.

se igualan. Dicho de otro modo: uno de los materiales adquiere una carga neta positiva y el otro, negativa. De esta manera, y debido al simple contacto entre dos metales, se genera un potencial eléctrico del orden del voltio: es el efecto Volta.

¿Qué sucede a mayor temperatura? En tal caso, algunos electrones experimentan excitaciones térmicas; es decir, abandonan su nivel de energía inicial para ocupar uno superior al de Fermi. Esas excitaciones y el modo en que se reparten los electrones entre las energías por encima del nivel de Fermi dependen de la naturaleza del metal. Cuando forzamos la transferencia de electrones de un metal a otro imponiendo que circule una corriente eléctrica, la energía media de los electrones cambia y en la corriente aparecerá una discontinuidad a la altura del contacto, equivalente a una diferencia de potencial del orden del milivoltio. Esa discontinuidad se traduce en un desprendimiento o en una absorción de calor con una potencia proporcional al número de cargas que circulan; esto es, a la intensidad de la corriente. He aquí el efecto Peltier.

Esta interpretación microscópica explica también el efecto inverso: la generación de una corriente eléctrica a partir de una diferencia de temperatura. Tomemos un hilo metálico y hagamos que sus extremos adopten temperaturas diferentes. En la parte caliente los electrones experimentarán más excitaciones térmicas que en la fría, por lo que, en promedio, exhibirán una mayor diferencia de energía con respecto al nivel de Fermi. De esta manera, comenzarán a fluir de manera espontánea hacia la zona fría.

En un hilo aislado, ese movimiento de cargas provocado por una diferencia de temperaturas induce la aparición de un potencial, el cual aumentará hasta que el campo eléctrico resultante detenga el flujo de cargas. En un hilo de otro material, la diferencia de potencial alcanzará otro valor. Así pues, si unimos ambos formando un bucle, la diferencia de potencial a lo largo de una vuelta completa no será nula, por lo que se establecerá una corriente.

De esta manera, y sin más que calentar las soldaduras de ambos hilos a temperaturas diferentes habremos conseguido un generador eléctrico. Este fenómeno recibe el nombre de efecto Seebeck, el cual fue descubierto por el físico alemán Thomas Seebeck en 1823, unos diez años antes del hallazgo del efecto Peltier.

Módulos termoeléctricos

El efecto Seebeck puede aprovecharse para construir módulos termoeléctricos que generen electricidad a partir de dos fuentes de calor a temperaturas distintas. La eficacia de esos dispositivos depende solo de una cantidad: el «factor de mérito», el cual es proporcional a la capacidad termoeléctrica del material dividida por el producto de su resistividad eléctrica y su conductividad térmica. A la vista de esta relación, los materiales muy conductores (de baja resistividad) pueden parecer tentadores. Sin embargo, suelen presentar una capacidad termoeléctrica escasa y una conductividad térmica elevada.

De hecho, estas tres magnitudes (capacidad termoeléctrica, resistividad eléctrica y conductividad térmica) no son independientes, ya que se encuentran íntimamente ligadas a la estructura electrónica del material. Las investigaciones en este campo siguen por tanto muy activas en busca del mejor compromiso de estas propiedades en función de las condiciones de uso, especialmente la temperatura.

Por regla general, estos módulos se componen de semimetales o semiconductores muy «dopados» (con impurezas añadidas de forma controlada). Uno de los dos elementos del módulo es un material dopado de tipo *n*, en que la conducción queda a cargo de los electrones (de carga negativa, de ahí la *n*), y el otro de tipo *p*, en que la conducción la aseguran los «agujeros», de carga positiva (un agujero corresponde a la ausencia de un electrón), y en los que la capacidad termoeléctrica es de signo opuesto. Al asociarlos, se obtiene el bucle de corriente deseado.

Este tipo de generadores termoeléctricos se instalan en las sondas espaciales que se alejan demasiado del Sol. En este caso el foco caliente lo constituye una pastilla radiactiva, mientras que el foco frío es un radiador que disipa el calor al espacio.

Recuperar el calor desperdiciado

Puede demostrarse que, con un factor de mérito de 1 —un valor posible en la actualidad— y una diferencia de temperaturas entre los focos térmicos de 300 grados Celsius, el rendimiento del dispositivo equivale al 8 por ciento del rendimiento teórico ideal alcanzable por un motor (el rendimiento de Carnot, muy lejano de las eficiencias de los motores clásicos). Con una diferencia de temperaturas de 25 grados, dicha proporción se reduce al 1 por ciento. Aunque no deja de tratarse de una cifra modesta, no faltan las aplicaciones.

Por ejemplo, ¿por qué no recuperar el calor corporal que meramente disipamos al aire ambiente a través de nuestra piel? Ya en 1982, bastante antes de la linterna

de bolsillo de Makosinski, vimos aparecer un reloj termoeléctrico: el modelo Thermatron de Bulova. En torno al cambio de siglo siguieron otros; el de la casa Citizen contaba con una pila alimentada por más de 1000 soldaduras, las cuales desarrollaban una potencia de 14 microvatios y una tensión de 500 milivoltios por cada grado Celsius de diferencia de temperatura.

No dejan de surgir proyectos que no cuajan en el comercio, como la pulsera termoeléctrica de Dysson (2009) para alimentar teléfonos o tabletas. La limitación reside en la baja diferencia de temperaturas. A 10 grados Celsius de temperatura ambiente, por ejemplo, la diferencia con la temperatura corporal es de unos 25 grados. El rendimiento ideal de Carnot asciende en tal caso a un 8 por ciento, lo que significa que la eficiencia de conversión de nuestro dispositivo termoeléctrico será muy baja: inferior al 0,1 por ciento.

Un camino prometedor parece hallarse en la automoción. Casi dos tercios de la potencia de un vehículo de gasolina acaban disipándose en forma de calor, del que un tercio emana por el sistema de escape. De esta manera, un vehículo que en una hora consuma 7 litros de carburante expulsará cerca de 20 kilovatios en sus gases de escape.

Ahora bien, la temperatura de esos gases puede llegar a los 700 grados Celsius. Si se hacen pasar por unos módulos termoeléctricos cuya parte fría se mantenga a 100 grados gracias a un fluido refrigerante (el aire ambiente no basta), se conseguirá una diferencia de temperaturas de 600 grados y un muy buen rendimiento de Carnot, del 62 por ciento. Incluso con módulos baratos resulta posible generar unos 200 vatios de potencia eléctrica, cuyo reciclado podría rebajar en cierta medida el consumo de combustible. Numerosos fabricantes y subcontratistas, como BMW o Valeo, están investigando en este terreno.

PARA SABER MÁS

Effet Volta, effet Peltier. J.-P. Barrat en *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n.° 705, páginas 779-785, junio de 1988.

La recherche de nouveaux matériaux thermoélectriques. S. Hébert en *Reflects de la Physique*, n.° 41, págs. 18-22, octubre de 2014.

A review of car waste heat recovery systems utilising thermoelectric generators and heat pipes. B. Orr et al. en *Applied Thermal Engineering*, vol. 101, págs. 490-495, mayo de 2016.

por Bartolo Luque

Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid. Sus investigaciones se centran en la teoría de sistemas complejos.



Tipografía digital

De los mapas de bits a los polinomios de Bernstein y las curvas de Bézier

Es bien conocido que, durante el Renacimiento, artistas y matemáticos se dedicaron a aplicar el legado geométrico de la Grecia clásica a la pintura, la escultura y la arquitectura. Menos sabido es que lo mismo ocurrió con el diseño tipográfico. La invención y difusión de la imprenta convirtió el diseño de tipos en una necesidad donde la proporción y la geometría actuaron de guías. Artistas matemáticos como Luca Pacioli, Leonardo da Vinci o Alberto Durero incluyeron en sus obras descripciones precisas para el diseño de letras, siguiendo la vieja tradición geométrica griega de dibujar solo con regla y compás.

El matemático Luca Pacioli, de quien ya hemos hablado en esta columna, se preocupó en 1509, durante la impresión de su tratado *De divina proportione*, ilustrado por Da Vinci, por las proporciones armónicas ideales entre la masa impresa de tinta y la superficie del papel en blanco. Y dio instrucciones precisas para la elaboración de un alfabeto, que denominó *alphabeto dignissimo antico*, donde usaba básicamente cuadrados y círculos. El pintor Alberto Durero dedicó en 1525 un capítulo de su famosa obra *Los cuatro libros de la medida* a cómo aplicar reglas geométricas al diseño del alfabeto latino y gótico. Durero insertaba sus letras en cuadrados en los que determinaba lo que consideraba sus proporciones armónicas.

Las instrucciones que dictaron Durero y Pacioli para dibujar sus letras latinas y góticas pueden considerarse el inicio de la tipografía matemática. Durero, al crear su famosa firma (un monograma donde una D se insertaba dentro de una A, el cual estamparía en todas sus obras a partir de 1496) no solo enarbola el estandarte renacentista de la individualidad, sino que también marca el comienzo de la Edad Moderna del diseño tipográfico de identidad corporativa. A partir de entonces, la tipografía se convertiría en una fructífera área del diseño gráfico que, intentando pasar desapercibida, está presente de forma casi continua en nuestras vidas.

La llegada del ordenador

Cuatrocientos años más tarde, otra revolución tecnológica impactaría de forma decisiva en el diseño de tipos. A mediados de los años ochenta del siglo xx los ordenadores personales y la impresora láser transformaron de nuevo la tipografía. Con un ordenador corriente se conseguía componer texto con niveles de calidad similares a los de los sistemas profesionales: había nacido la tipografía digital.

Las primeras fuentes para ordenador eran de tipo *bitmap*, o de mapa de píxeles, y se usaban en publicaciones sin grandes exigencias técnicas. También conocidas como «rásters», su formato más elemental consiste en matrices rectangulares en las que un 1 significa un píxel negro, y un 0, uno blanco. De esta manera, la definición en pantalla o en un documento impreso de cada glifo depende del número de píxeles de la matriz que lo representa.

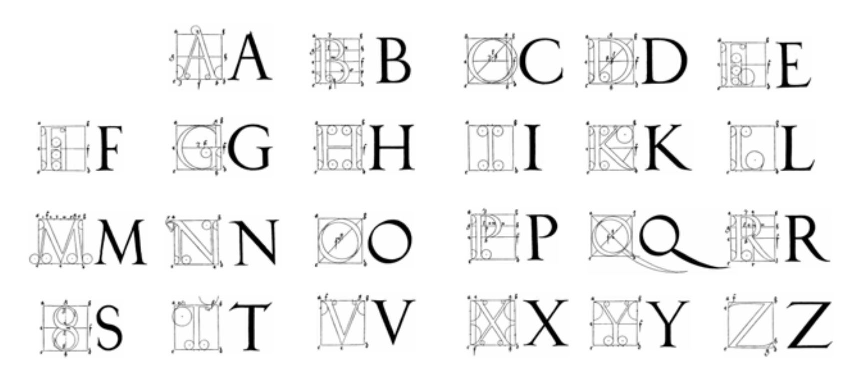
El problema con este formato es que, cuando intentamos aumentar de tamaño o girar la fuente, perdemos definición y se producen distorsiones notables. De modo que si nuestros tipos de letra están definidos por mapas de píxeles, necesitamos almacenar una matriz diferente para cada tamaño: un gasto en memoria tremendo si tenemos en cuenta la cantidad de tipos que nos permite hoy en día cualquier programa de edición.

¿Cómo almacenan entonces los ordenadores actuales las fuentes tipográficas para conseguir que cambiemos sus tamaños en un suspiro y sin pérdida de definición? Utilizando fuentes vectoriales, que a partir de un único diseño reproducen la forma de la letra en el cuerpo que resulte necesario. Su génesis es una de esas historias en ciencia de caminos que se cruzan.

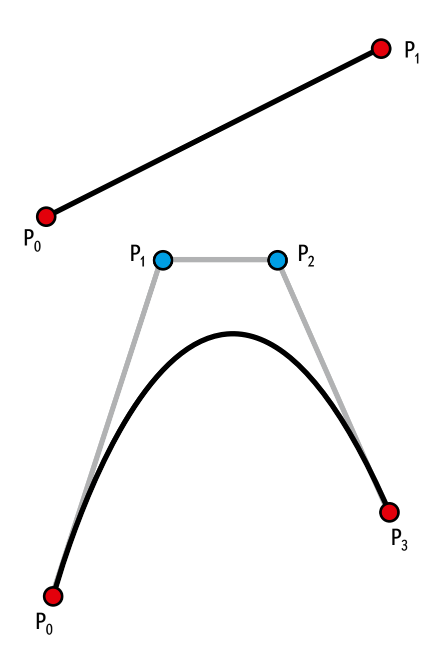
Polinomios de Bernstein y curvas de Bézier

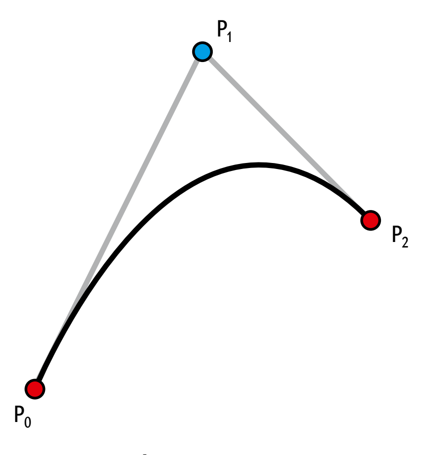
Hacia los años sesenta del siglo pasado, el físico y matemático Paul de Faget de Casteljau y el ingeniero Pierre Étienne Bézier trabajaban en la industria automovilística para Citroën y Renault, respectivamente. Ambos estaban interesados en encontrar nuevas herramientas matemáticas que ayudaran de manera intuitiva a los diseñadores a manipular en el ordenador formas complejas, como los perfiles de las carrocerías o las piezas de los coches. El problema era especialmente crítico en el caso de las «formas libres» que no admitían una sencilla especificación con pocos parámetros. Para solventarlo recurrieron a los llamados polinomios de Bernstein, que, como veremos, son la base polinómica de las curvas de Bézier, el núcleo de la solución.

Aunque esta base polinómica era conocida desde 1912, no contó con una apli-



EL FAMOSO alfabeto latino de Durero.





CURVAS DE BÉZIER (*negro*) de grados 1, 2 y 3 junto con sus puntos de control (*rojo*) y polígonos correspondientes (*gris*).

cación gráfica hasta casi medio siglo después, cuando Paul de Casteljau la empleó en el diseño de carrocerías utilizando un algoritmo numéricamente estable que hoy lleva su nombre. En 1962, Pierre Bézier publicó y popularizó su uso hasta el extremo de que hoy se llaman curvas de Bézier y no de Casteljau, como sería de justicia.

Para ver cómo son las curvas de Bézier, comencemos por la más sencilla. Consideremos dos puntos del plano, $\vec{P}_0 = (x_0, y_0)$ y $\vec{P}_1 = (x_1, y_1)$. La curva lineal de Bézier entre ellos queda descrita por la siguiente parametrización:

$$\vec{B}(t) = (1-t)\vec{P}_0 + t\vec{P}_1,$$

donde t varía entre 0 y 1. Observemos que cuando $t = 0$ obtenemos el punto de arranque, $\vec{P}_0$. Los sucesivos valores de t nos irán proporcionando los restantes puntos de la curva hasta $t = 1$, que corresponde al punto final, $\vec{P}_1$. El lector puede comprobar con facilidad que esta ecuación describe una línea recta entre ambos (*véase la figura superior*).

Las curvas cuadráticas de Bézier se construyen a partir de tres puntos arbitrarios. Su ecuación paramétrica es:

$$\vec{B}(t) = (1-t)^2\vec{P}_0 + 2t(1-t)\vec{P}_1 + t^2\vec{P}_2.$$

En este caso se trata de una parábola que comienza en $\vec{P}_0$ y acaba en $\vec{P}_2$. Las curvas cúbicas de Bézier necesitan cuatro puntos y adoptan la forma:

$$\vec{B}(t) = (1-t)^3\vec{P}_0 + 3t(1-t)^2\vec{P}_1 + 3t^2(1-t)\vec{P}_2 + t^3\vec{P}_3.$$

Vayamos a la generalización: a partir de $n + 1$ puntos arbitrarios $\vec{P}_0$, $\vec{P}_1$, $\vec{P}_2$,..., $\vec{P}_n$, a los que llamaremos «puntos de control», podemos construir la curva de Bézier de grado n:

$$\vec{B}(t) = \sum_{i=0}^{n} \binom{n}{i} t^i (1-t)^{n-i} \vec{P}_i,$$

donde $\binom{n}{i}$ es el coeficiente binomial, o número combinatorio. Los coeficientes de la suma anterior:

$$b_{i,n}(t) = \binom{n}{i} t^i (1-t)^{n-i}$$

son los célebres polinomios de grado n de Bernstein.

Si unimos los puntos de control mediante segmentos, formaremos el llamado polígono de Bézier, o de control. La curva de Bézier está en el interior del polígono, que, de hecho, proporciona una versión poligonal de la propia curva. Observemos que la curva comienza en $\vec{B}(0) = \vec{P}_0$, tangente al primer segmento del polígono, y termina en $\vec{B}(1) = \vec{P}_n$, tangente al último. Si deseamos que la curva sea cerrada nos bastará con hacer $\vec{P}_0 = \vec{P}_n$.

Si alguna vez ha usado un programa que permite modificar objetos geométricos predefinidos, como PowerPoint, habrá observado que en la pantalla aparecen una serie de puntos que, al moverlos, modifican el aspecto global de la curva. Se trata de los puntos de control de las curvas de Bézier que utiliza el programa. La modificación de la curva es instantánea. Y a pesar de que, al variar la posición de un punto de control, la curva cambia globalmente, las mayores deformaciones son locales, lo que hace que la modificación resulte muy intuitiva: justamente lo que buscaban Casteljau y Bézier.

Propiedades de transformación

Visto su origen en el diseño asistido por ordenador, no es de extrañar que las curvas de Bézier sean hoy una herramienta básica en programas de diseño y dibujo vectorial, como Adobe Illustrator, Corel Draw o Inkscape; de animación vectorial, como Adobe Flash; o de retoque fotográfico, como Photoshop o Gimp, por citar algunos ejemplos bien conocidos. Pero quizá sorprenda al lector descubrir que se encuentran también en el corazón de PostScript o PDF. Pero ¿qué hace que las curvas de Bézier sean tan aptas para nuestros propósitos?

La razón se debe a dos asombrosas propiedades de estas curvas. La primera es que, si deseamos someter una curva de Bézier a una transformación afín (una translación, un cambio de escala o una rotación), basta con transformar los puntos de control, que son los únicos valores que necesitamos almacenar para definirla. En lenguaje matemático, si F es una transformación afín y la aplicamos a una curva de Bézier:

$$\vec{B}(t) = \sum_{i=0}^{n} b_{i,n}(t)\vec{P}_i,$$

obtendremos que:

$$F\left(\vec{B}(t)\right) = \sum_{i=0}^{n} b_{i,n}(t)F(\vec{P}_i),$$

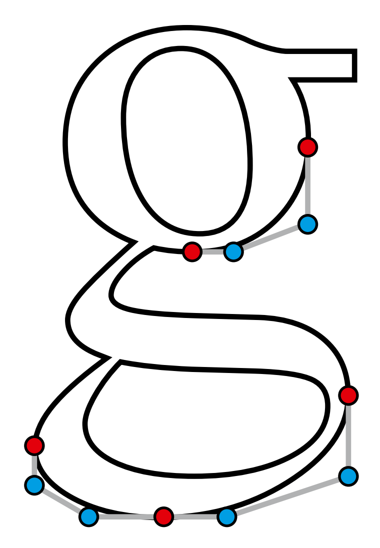
algo extraordinariamente difícil de conseguir con otras posibles representaciones de la curva.

La segunda propiedad guarda relación con la estabilidad numérica del algoritmo que genera las curvas y con su eficiencia: algo que no pueden superar otros métodos (como un desarrollo en serie de Taylor, por ejemplo) y que constituye la base del éxito del algoritmo de Casteljau. Ello se debe a que toda curva de Bézier de grado n puede expresarse de manera recursiva, una cualidad muy deseable en programación. En concreto, si los puntos de control de una curva de Bézier $\vec{B}(t)$ son $\vec{P}_0$, $\vec{P}_1$, $\vec{P}_2$, ..., $\vec{P}_n$, entonces:

$$\vec{B}(t) = (1-t)\vec{B}_{\vec{P}_0\vec{P}_1\cdots\vec{P}_{n-1}} + t\vec{B}_{\vec{P}_1\vec{P}_2\cdots\vec{P}_n}.$$

Así que podemos decir que una curva de grado n es una interpolación entre dos curvas de grados $(n-1)$. Algo sorprendente y extrañamente familiar al mismo tiempo.

Las curvas de Bézier más usadas son las cuadráticas y las cúbicas, ya que las de grado mayor resultan muy costosas computacionalmente de evaluar. Por tanto, cuando se necesitan formas muy complejas, como la letra que reproducimos aquí



LETRA G obtenida al empalmar curvas de Bézier de grado tres. La figura muestra los puntos de control de tres tramos.

(*véase la figura superior*), se emplean curvas de Bézier de bajo orden para cada una de las partes y luego se empalman. Estas curvas compuestas son conocidas como «trayectorias» en el lenguaje de los gráficos vectoriales. Para garantizar la suavidad del resultado final, el punto de control donde empalman dos curvas se sitúa sobre la línea recta que une los dos puntos de control a cada lado. De esta manera, si queremos aumentar o disminuir el tamaño, solo tenemos que modificar los puntos de control y tendremos al instante la misma letra al tamaño deseado y sin malformaciones ni pérdida de definición (¿puede el lector adivinar por qué a partir de lo que hemos visto?). Así, las fuentes TrueType utilizan curvas compuestas formadas por curvas cuadráticas de Bézier, PostScript o Metafont emplean curvas cúbicas, y las fuentes OpenType pueden usar cualquiera de las dos, dependiendo de la complejidad de la tipografía.

Concluyamos con un par de consideraciones que van más allá de la geometría. Las curvas de Bézier pueden interpretarse de forma probabilística, ya que los polinomios de Bernstein constituyen una partición de la unidad:

$$\sum_{i=0}^{n} b_{i,n}(t) = 1$$

y, como sabemos, las probabilidades han de cumplir siempre la condición de que la suma de todas ellas ha de ser igual a 1. Por tanto, si interpretamos los polinomios como probabilidades y t como una variable temporal, tendremos una distribución binomial dependiente del tiempo.

Por ejemplo, imaginemos una partícula moviéndose por el espacio. Si interpretamos $b_{i,n}(t)$ como la probabilidad de que la partícula se encuentre en el punto de control $\vec{P}_i$ en el instante t, la curva de Bézier representará el «camino esperado» que tomará la partícula a medida que t crece de 0 a 1.

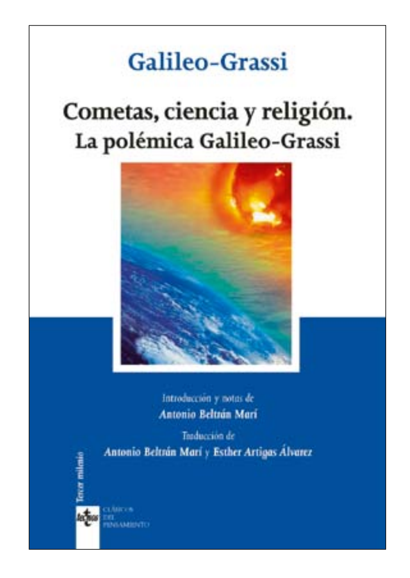
Podemos también idear una interpretación física: si consideramos que el polinomio de Bernstein $b_{i,n}(t)$ proporciona el valor de una masa dependiente del tiempo que se encuentra situada en el punto de control $\vec{P}_i$, entonces la curva de Bézier especificaría la trayectoria del centro de masas a medida que transcurre el tiempo.

¿Se le ocurre al lector alguna aplicación más de las curvas de Bézier a partir de estas consideraciones?

PARA SABER MÁS

The Bernstein polynomial basis: A centennial retrospective. Rida T. Farouki en *Computer Aided Geometric Design*, vol. 29, n.° 6, págs. 379-419, agosto de 2012.

A primer on Bézier curves: A free, online book for when you really need to know how to do Bézier things. Mike «Pomax» Kamermans. Disponible en **pomax.github.io/bezierinfo**



COMETAS, CIENCIA Y RELIGIÓN
LA POLÉMICA GALILEO-GRASSI

Introducción y notas de Antonio Beltrán Marí.
Traducción de Antonio Beltrán Marí
y Esther Artigas Álvarez
Tecnos, 2016.

Modelos cosmológicos y religión

La filosofía natural de Galileo a través de su enfrentamiento con Orazio Grassi

El volumen objeto de esta reseña contiene cinco obras relacionadas con una polémica entre Galileo y Orazio Grassi, matemático del Colegio Romano, la institución de enseñanza de los jesuitas, la cual tuvo lugar a raíz de la observación de tres cometas en 1618. Dos de esas obras están traducidas del latín por Esther Artigas: *Disertación astronómica sobre los tres cometas del año 1618* y *Balanza astronómica y filosófica*, ambas de Grassi. Las tres restantes están traducidas del italiano por Antonio Beltrán Marí: *Discurso sobre los cometas*, publicado con el nombre del discípulo de Galileo Mario Guiducci, aunque es bien conocido que el autor intelectual es Galileo; *Carta al muy reverendo padre Tarquinio Galluzzi*, de Mario Guiducci, y *El ensayador*, de Galileo. Ninguna de ellas contaba con versión castellana salvo *El ensayador*, que se había publicado con una breve introducción y escasas anotaciones. En relación con esta última, la presente edición incluye, además, las apostillas de Galileo que aparecen en su ejemplar de *Balanza astronómica y filosófica*, lo cual no ocurre en ninguna otra edición, salvo la crítica. La traducción de los textos es excelente y viene acompañada de notas siempre informativas y pertinentes. Se incluyen también trece apéndices que aclaran con eficacia los puntos más complejos.

Merece la pena subrayar la importancia de la publicación conjunta de los cinco textos. En cuanto a *El ensayador*, una de las obras fundamentales de Galileo, es solo cuando se tiene la oportunidad de leerlo iluminado por el contexto de la polémica sobre los cometas cuando puede apreciarse su carácter de manifiesto de la filosofía natural galileana en todas sus dimensiones.

El Decreto de la Congregación del Índice del 5 de marzo de 1616 había condenado como «falsa y totalmente contraria a la Divina Escritura» la teoría copernicana «sobre la movilidad de la Tierra y la inmovilidad del Sol». La condena suponía un serio obstáculo para el progreso de la campaña copernicana en la que Galileo estaba empeñado hacía tiempo, desde que había llegado a la conclusión de que una Tierra móvil no chocaba con la experiencia y había llevado a cabo sus descubrimientos telescópicos, los cuales ponían en duda uno de los principios básicos de la cosmología tradicional: la diferencia entre las regiones sublunar y la supralunar. En particular, el descubrimiento de las fases de Venus suponía, si no una prueba del sistema copernicano, sí una demostración de que Venus no giraba en torno a la Tierra, sino alrededor del Sol. A su juicio, los descubrimientos telescópicos, junto con las nuevas ideas sobre el movimiento, proporcionaban herramientas suficientes para contrarrestar los argumentos del sistema tradicional. El Decreto interrumpía bruscamente la campaña copernicana: a Galileo se le advirtió de que no defendiera la verdad física de sus hipótesis.

La situación cambiaría con la aparición de tres cometas en el otoño de 1618, y en particular del último, observado en noviembre. El revuelo fue notable, algo fácil de entender si tenemos en cuenta cómo se consideraban entonces tales «novedades celestes»: no como fenómenos dignos de la atención de los astrónomos, sino como verdaderos signos que anunciaban sucesos de toda índole. Conocidos desde la Antigüedad, habían sido estudiados con mayor detenimiento por Tycho Brahe, quien, basándose en observaciones precisas y en un estudio detallado de sus trayectorias, los había situado en la región celeste, en órbitas centradas en el Sol. Su estudio de los cometas le había animado a proponer un sistema cosmológico alternativo al copernicano: uno geoheliocéntrico en el que, alrededor de una Tierra inmóvil, orbitaban la Luna y el Sol, con los demás planetas girando alrededor de este. El sistema de Brahe proporcionaba así una útil alternativa a los partidarios de la tradición, quienes eran conscientes de las dificultades en las que se hallaba el sistema aristotélico-ptolemaico tras las observaciones telescópicas de Galileo [*véase* «El caso contra Copérnico», por Dennis Danielson y Christopher M. Graney; Investigación y Ciencia, diciembre de 2014].

El Colegio Romano organizó una serie de conferencias sobre la cuestión. Una de ellas se publicó de forma anónima, aunque era sobradamente conocido que su autor era el padre Grassi, el matemático del Colegio. Como Tycho, Grassi situaba el cometa en la región supralunar, en una trayectoria circunsolar.

La extensa introducción de Antonio Beltrán analiza con todo detalle el contexto y los términos de la polémica. Previamente examina con agudeza crítica las interpretaciones avanzadas hasta la fecha, las cuales parten de un mismo planteamiento: al sobrio discurso de Grassi, confinado al ámbito de la astronomía, Galileo responde con inusitada dureza y con una propuesta *ad hoc* sorprendentemente conservadora, cercana a las tesis aristotélicas. Galileo propone que el origen del cometa se encuentra en una exhalación de la Tierra que asciende en línea recta por la prolongación de un radio terrestre. Es este último punto el que ha causado perplejidad entre los historiadores, quienes han propuesto dos líneas de interpretación. En primer lugar, el carácter polemista de Galileo, o su despecho ante lo que percibe como un ataque a su estatus profesional. En fecha más reciente, apoyándose en la revalorización de las aportaciones de la orden jesuita a la construcción de la ciencia moderna, la polémica se ha explicado por una animadversión injustificada de Galileo y por su miopía ante la presencia de elementos que, dentro de la orden, luchaban por la aceptación de las nuevas ideas.

La introducción discute con un análisis acerado y contundente ambas interpretaciones, pero va más allá de una revisión crítica: plantea —y responde— nuevas preguntas. Ambas interpretaciones encierran un denominador común: ignorar el contenido teórico de la polémica. Con lo cual, afirma Beltrán, se comete el «despropósito de pretender hacer historia de la filosofía y de la ciencia sin filosofía y sin ciencia». La propuesta de Beltrán es distinta: una lectura atenta de los dos primeros documentos, la *Disertación* de Grassi y el *Discurso* de Galileo, permite poner de manifiesto algo que se irá aclarando a lo largo de la polémica: el hecho de que en el trasfondo de esta hubo siempre el debate cosmológico. La disertación de Grassi no es cosmológicamente neutral: acepta los presupuestos fundamentales de la teoría cometaria de Brahe, aunque sin reconocerlo (lo hará más tarde) y, por consiguiente, acepta el sistema geoheliocéntrico, ya que es de este modo como pueden ponerse de manifiesto las insuficiencias de la teoría copernicana con respecto a los cometas. Galileo lo ha visto claramente y ha aceptado el desafío.

Su teoría cometaria no pasa de ser una conjetura, problemática sin duda, pero es algo más que una hipótesis *ad hoc*. De hecho, Galileo ya había propuesto una idea similar con respecto a la nova de 1604. Más aún, ni siquiera era una idea original suya. Si la rescata ahora es como instrumento en la polémica, no contra Grassi, sino contra el sistema ticónico en el que, de hecho, se basa el matemático jesuita.

Es precisamente subrayando el trasfondo del debate sobre el copernicanismo como pueden entenderse los demás motivos de la polémica: así planteada, permite apreciar que lo que tenía lugar era un choque frontal entre dos concepciones muy distintas de la filosofía natural y de su relación con la religión. Para Grassi, la religión dicta los términos a la filosofía natural, la «santa obediencia» está por encima de todo lo demás. Para Galileo, en una filosofía natural digna de este nombre la única autoridad está en la demostración matemática y en la experiencia; la religión no desempeña, ni debe hacerlo, ningún papel.

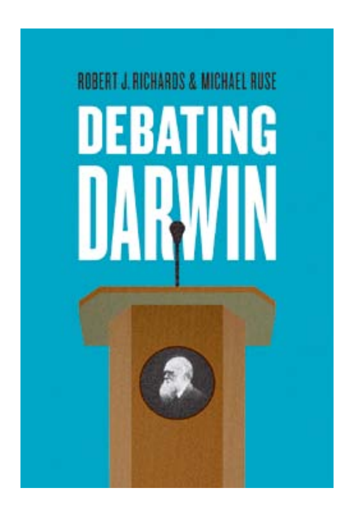
Es esta cuestión sobre el principio de autoridad la que ocupa el lugar central en *El ensayador*, una obra fundamental de Galileo en tanto que manifiesto de la filosofía natural galileana y su correspondiente epistemología. El lector encontrará en *El ensayador* pasajes bien conocidos, como el del libro de la naturaleza, en el que lo nuevo no estriba en la metáfora del libro (casi un lugar común en la época y aun en épocas anteriores), sino en la declaración acerca de la sintaxis, matemática, que relaciona los caracteres en que está escrito ese libro. Lejos de ser una simple imagen literaria, el texto es todo un manifiesto en pro de una filosofía natural matemática, con el consiguiente desafío a la jerarquía disciplinar tradicional. De una posición de subordinación a la filosofía, un mero instrumento de cálculo, la matemática debe convertirse, según Galileo, en el medio privilegiado de alcanzar un conocimiento de la realidad física.

Otro tanto cabe decir con respecto a la declaración sobre la cuestión de las cualidades reales de los objetos, que, para Galileo, son únicamente aquellas que resulta posible matematizar. Leídos en conjunto, estos textos proporcionan toda una declaración de los principios que fundamentan la filosofía natural matemática que Galileo se esforzó en construir a lo largo de toda su carrera. Perseguir este objetivo fue lo que le motivó a dejar su puesto de profesor de matemáticas en Padua por el de Primer Matemático y Filósofo en la corte del Gran Duque de la Toscana, título que reivindicó precisamente porque se consideraba filósofo en tanto que matemático.

Menos conocido quizá, pero interesante por su contenido epistemológico, es el pasaje de la fábula del sonido. En absoluto se trata de una declaración de escepticismo epistemológico: para Galileo, una filosofía natural que se construye mediante demostraciones matemáticas y experiencias sensatas alcanza resultados bien fundados, aunque no pueda ofrecer un conocimiento exhaustivo de todos los fenómenos que presenta una naturaleza sometida a leyes inexorables.

En su introducción y sus notas, Antonio Beltrán se mueve dentro del marco historiográfico que había ido construyendo a lo largo de su carrera de estudioso de la obra de Galileo, desde su edición del *Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo* hasta su monumental *Talento y poder* (Laetoli, 2007), y que muestra aquí de nuevo toda su capacidad interpretativa. Su prematura desaparición en 2013 hace que, lamentablemente, este volumen se constituya en un bello monumento a su memoria.

—José Romo
Departamento de Filosofía
Universidad de Barcelona



DEBATING DARWIN
Robert J. Richards y Michael Ruse
The University of Chicago Press, 2016

Las raíces intelectuales de Darwin

¿Ciencia provinciana o ciencia cosmopolita?

Hace tiempo que la evolución entró en el ejercicio común de la ciencia. Si en biología constituye su motor, en otras disciplinas abre nuevas cuestiones. Consideremos la fosilización geológica. ¿Cómo fosilizó la biota del Ediacárico, compuesta por organismos que existieron hace entre 571 y 541 millones de años, los cuales comprenden fósiles que se encuentran en capas rocosas de todos los continentes a excepción de la Antártida? Muchos de ellos eran de cuerpo blando, cuyos tejidos no se muestran en absoluto proclives a conservarse en registros rocosos. Sin embargo, se acaba de poner de manifiesto que los océanos ediacáricos impulsaron la fosilización: sus

aguas eran más ricas en silicio que las de los mares modernos, lo que ayudó a preservar los animales.

Consideremos un par de muestras más: una teórica y otra aplicada a la sistemática. En la evolución convergente, condiciones ambientales similares producen adaptaciones similares. ¿Existe una convergencia pareja en los componentes moleculares de esos cambios morfológicos? Aunque pudiera parecer verosímil, se ha comprobado que los caracteres adaptativos convergentes no surgen siempre de los mismos cambios genéticos. Los dinosaurios terópodos dieron origen a las aves, vía por la que han llegado hasta nuestros días. En cambio, los placodermos, un grupo de peces que dominaron las aguas del Devónico, no ofrecían interés evidente para un enfoque evolutivo. Esta idea ha quedado cuestionada a raíz de descubrimientos recientes en China. Los placodermos presentaban una función de gozne en la evolución de los vertebrados: la aparición de mandíbulas en estos peces constituye un punto de inflexión en la evolución de los vertebrados iniciales. Los primeros peces mandibulados ocuparon un rango depredador en la cadena trófica y se diversificaron en numerosos nichos.

En 1859, Charles Darwin presentó en *On the origin of species* su teoría de la evolución a través de la selección natural. Con ello Darwin cambió no solo la ciencia, sino también la filosofía. Mas si entre la comunidad científica nadie cuestiona esa doctrina, entre sociólogos, humanistas y filósofos la reacción es dispar. Pocos negarán su poder explicativo en el desarrollo de las especies vegetales y animales, pero muchos se mostrarán reticentes a la hora de aplicar consideraciones evolutivas a la conducta humana y las relaciones sociales.

Con todos los recursos disponibles y con bibliotecas enteras de estudios sobre Darwin y su teoría, cabría esperar que se hubiera alcanzado un relato canónico. Ciertamente existe acuerdo en las grandes líneas. Sabemos cuándo y cómo abordó Darwin la transmutación de las especies y qué le estimuló a formular el principio de la selección natural. Podemos trazar con buena aproximación la trayectoria de sus creencias y su convicción de incluir al hombre en el proceso evolutivo. Pero quedan todavía por aclarar lagunas sobre las influencias recibidas. Michael Ruse y Robert J. Richards proponen aquí dos fuentes distintas. Pudiera pensarse que la divergencia entre ellos obedece a su formación y especialización académica: Ruse se ha desenvuelto siempre en departamentos de filosofía y Richards en los de historia. No es el caso, pues ambos se ocupan de cuestiones históricas y filosóficas.

Ruse ve en la obra de Darwin un arquetipo de la ciencia británica: Darwin era un británico educado en la cultura británica, que, aparte de sus cinco años de navegación a bordo del *Beagle*, pasó toda su vida en Inglaterra. De sus mentores intelectuales destaca a Adam Smith, teórico de la división del trabajo en los comienzos de una sociedad fabril. Tesis que Darwin aplica a su concepción de la selección, junto con la del crecimiento de la población de Thomas Malthus.

Por su parte, Richards sostiene que para interpretar a Darwin no importa la geografía física, sino su geografía mental, la cual se extiende mucho más allá de las islas británicas. Fue la explicación de los viajes de Alexander von Humboldt al Nuevo Mundo lo que indujo a Darwin a embarcarse en su propia aventura romántica. Ignorar el romanticismo alemán y su legado es perder la significación de los logros de Darwin en *On the origin of species* y *The descent of man*.

Ahí estriba la desavenencia: ¿fue Darwin un científico genuinamente británico, o uno con una actitud cosmopolita que abarcaba ideas del romanticismo alemán? De manera más específica, es este un debate sobre el mecanicismo y la mente en la naturaleza, sobre una teleología falsa o real y sobre el espejismo del sentido moral o el sentido moral real.

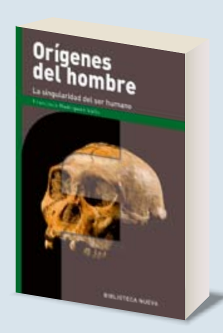
Las inclinaciones naturalistas de Darwin se forjaron en sus años estudiantiles en Cambridge. Coleccionista empedernido, le fascinaban los escarabajos. En Cambridge resultaba inevitable sentir el estímulo de Newton. ¿Qué es lo que hizo? ¿Qué es lo que hubiera hecho en nuestro tiempo? Reflejo de esa atmósfera fue *Preliminary discourse on the study of natural philosophy*, de John Herschel, que, por expresa recomendación de William Whewell, Darwin leyó de inmediato. Para Darwin, la selección natural no era una causa, sino una fuerza en el sentido newtoniano. Es ella la que moldea el mundo vivo, no su fin. Con los conceptos fundamentales de lucha por la existencia y selección natural, Darwin insertó su análisis en las prácticas y metáforas de su tiempo, la cultura industrial británica. Ilustración inglesa que pudo muy bien conjugarse con el romanticismo alemán.

—Luis Alonso

NOVEDADES



LOS INGENIEROS DE FRANCO
CIENCIA, CATOLICISMO Y GUERRA FRÍA EN EL ESTADO FRANQUISTA
Lino Camprubí
Crítica, 2017
ISBN: 978-84-16771-75-2
320 págs. (21,90 €)



ORÍGENES DEL HOMBRE
LA SINGULARIDAD DEL SER HUMANO
Francisco Rodríguez Valls
Biblioteca Nueva, 2017
ISBN: 978-84-16938-49-0
208 págs. (13,90 €)



TRANSGÉNICOS SIN MIEDO
TODO LO QUE NECESITAS SABER SOBRE ELLOS DE LA MANO DE LA CIENCIA
José Miguel Mulet
Destino, 2017
ISBN: 978-84-233-5242-5
288 págs. (17,90 €)

Recopilación de Daniel C. Schlenoff



Julio 1967

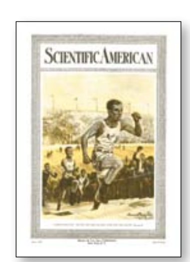
Fin a la «ley del mono»

«En Tennessee ha sido derogada la "ley del mono", que prohibía la enseñanza de la evolución en los centros de educación públicos del estado. Esa ley fue aprobada en 1925 y, posteriormente, en ese mismo año, dio lugar al famoso juicio que sentó jurisprudencia y cuyos protagonistas fueron John T. Scopes, el acusado, William Jennings Bryant, la acusación, y Clarence Darrow, la defensa. En sus 11 días, la vista se convirtió en una enconada confrontación entre el fundamentalismo religioso y la teoría biológica; pero el juez consideró que solo eran admisibles pruebas acerca de si Scopes había dado clases o no sobre la evolución, y el acusado fue condenado. La condena fue revocada a causa de un tecnicismo, pero la ley se mantuvo en vigor. En abril de este año, la Cámara Baja de la Asamblea legislativa de Tennessee votó la abolición de esa normativa; en mayo el Senado dio su conformidad y el gobernador aprobó la derogación.»

Memorias de acceso aleatorio

«Desde principios de la década de los cincuenta, la memoria de acceso aleatorio estándar era proporcionada por una estructura de diminutos núcleos anulares hechos de una ferrita, un material de magnetizado fácil. En su forma más simple, el conjunto de los núcleos se organiza ensartando $2n$ conductores de "palabra" en un sentido y m conductores de "dígito" en el otro sentido. Cada núcleo admite un bit de información que se guarda en función del sentido de la magnetización impuesta; en otras palabras, el núcleo "recuerda" el sentido de la corriente magnetizadora efectiva que lo atravesó la última vez. Los núcleos se cablean en su estructura mediante un engorroso trabajo manual, solo con unos rudimentarios útiles mecánicos.

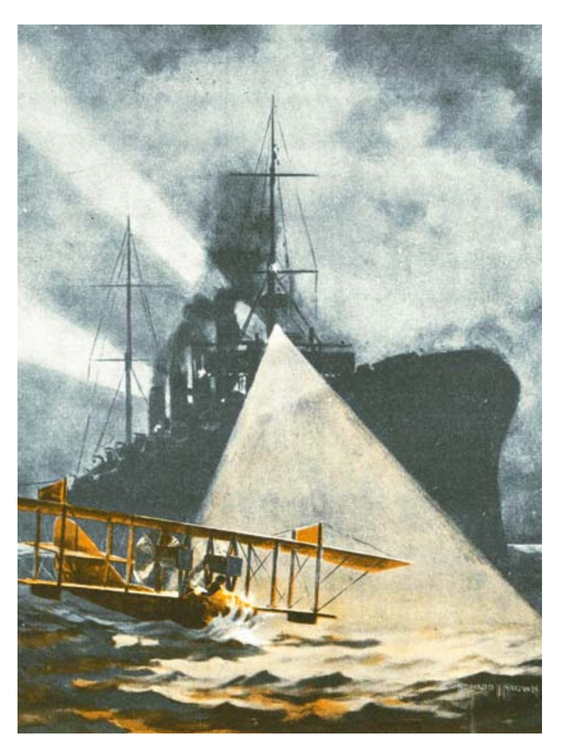
La situación no deja de ser irónica: el corazón de la computadora, símbolo de por sí de la mecanización, se manufactura por los mismos procedimientos con que antaño se confeccionaban brocados y alfombras. Aun así, las estructuras de núcleos han proporcionado unas memorias de acceso aleatorio fiables y rápidas para prácticamente todas las computadoras hoy en uso. A la vez, un importante logro ha sido producir memorias integradas entre sí en las que el elemento activo y sus conexiones se fabrican mecánicamente en un proceso unitario.»



Julio 1917

Vuelo nocturno

«Para mantener el patrullaje aéreo sobre las rutas que siguen las flotas se ha sugerido que los hidroaviones y dirigibles se abastezcan de bombas y combustible desde buques nodriza de la clase oficialmente conocida como "portahidroplanos" (*véase en la ilustración el aterrizaje nocturno de uno de ellos*). Con centenares de aviones cubriendo constantemente desde el aire vastas extensiones de agua, entrañaría un enorme riesgo que los submarinos se mostrasen en la superficie a la luz del día; y, por la noche, los grandes hidroaviones equipados con reflectores harían casi igualmente peligrosa la permanencia de los submarinos en la superficie para cargar las baterías.»



LA GUERRA EN EL MAR, 1917: Un avión de reconocimiento regresa a su buque nodriza por la noche.

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CXVII, Nº 4, 28 DE JULIO DE 1917



Julio 1867

Golosos

«El consumo medio de azúcar en Gran Bretaña durante 1860 fue de 16,4 kilogramos por habitante. En Bélgica, aunque el café no se toma endulzado, el gasto anual de azúcar por habitante se sitúa en 9,5 kilogramos. Entre los campesinos rusos el azúcar es un lujo desconocido, o al menos su uso por la población está restringido a los días de precepto y festividades religiosas, pues el consumo anual no es sino de unos 900 gramos por cabeza. Tras los británicos, el pueblo estadounidense consumimos más azúcar que cualquier otro país del mundo; y si al de azúcar añadiéramos el consumo de melaza y almíbar, cuya cifra conjunta asciende a 9,5 litros por cada hombre, mujer o niño, hallaríamos que ingerimos más alimentos edulcorados que nuestros amigos trasatlánticos.»

Lavandería francesa

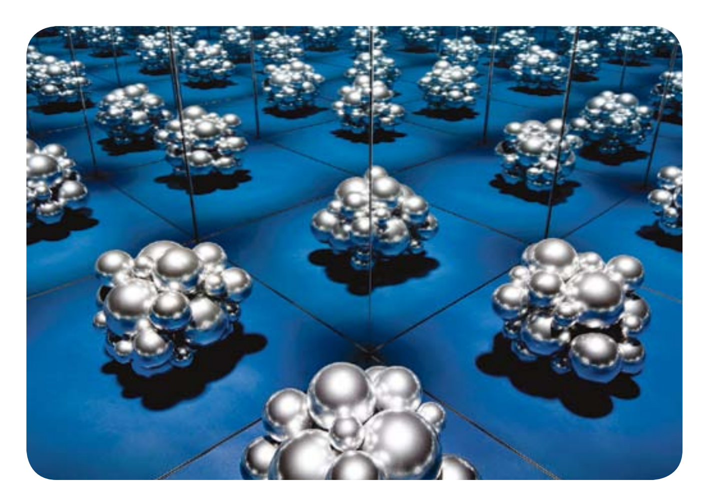
«La ropa blanca sucia del Grand Hôtel, el Hôtel du Louvre, el Grand Café y otros hoteles y cafés parisinos, es lavada a un ritmo de 40.000 piezas diarias en la lavandería de Courcelles, a unos cinco kilómetros de la terminal de Saint Lazare de los Ferrocarriles del Oeste. La ropa se hierve con jabón y sosa y luego se lava en pilas giratorias, se enjuaga, se seca parcialmente en máquinas centrífugas y acaba de secarse en hornos de aire caliente, los cuales arrastran casi tres kilos de humedad por kilo de carbón quemado; y, por último, se plancha entre rodillos pulidos y se empaqueta, con lo que queda lista para regresar a París.»

COSMOLOGÍA

El multiverso cuántico

Yasunori Nomura

Una sorprendente conexión entre la cosmología y la mecánica cuántica podría desvelar los secretos del espacio y el tiempo.





ASTROFÍSICA

El gran eclipse solar de 2017

Jay M. Pasachoff

Además de ofrecer un espectáculo excepcional, el eclipse solar total que este verano atravesará los Estados Unidos ofrecerá la posibilidad de estudiar el Sol en unas condiciones únicas.

BIOLOGÍA MARINA

Perdidos en el mar

Danielle L. Dixson

La acidificación del océano puede alterar de forma catastrófica el comportamiento de las criaturas subacuáticas.



FISIOLOGÍA

Disruptores endocrinos

Esther Fuentes y Ángel Nadal

Presentes en numerosos productos de uso común, interfieren con la función de nuestras hormonas y pueden perjudicar nuestra salud.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
DIRECTORA GENERAL
Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz, Bruna Espar Gasset
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN
EDITOR IN CHIEF AND SENIOR VICE PRESIDENT
Mariette DiChristina
PRESIDENT Dean Sanderson
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek



DISTRIBUCIÓN
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca - Trigo, 39 - Edificio B
28914 Leganés (Madrid)
Tel. 916 657 158
para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD
Prensa Científica, S. A.
Tel. 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Tel. 934 143 344 - Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros
El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO
Asesoramiento y traducción:
Javier Grande: *Cartas a los lectores y El extraño comportamiento de la estrella de Tabby*; Juan Pedro Campos: *Apuntes y Filmar el movimiento de las moléculas*; Andrés Martínez: *Apuntes y Zorros convertidos en perros*; Carlos Lorenzo: *Los albores de la tecnología*; Fabio Teixidó: *Los constituyentes primigenios de la Tierra y La India, una encrucijada energética*; Rosa Pujol Pina: *Los inexorables misterios de la esquizofrenia*; Alfredo Marcos: *La técnica y el proceso de humanización*; Ernesto Lozano Tellechea: *La charla*; Blanca Álvarez: *El mejor fármaco para cada uno*; J. Vilardell: *Curiosidades de la física y Hace...*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. de Caldes, km 3 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España